

Desenvolvimento de um sistema de Visão Computacional para a medição de desvios de trajetória, durante “Friction Stir Welding”

Hugo Miguel Carvalho Coimbra

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Fernando Gomes de Almeida

Coorientador na Höskolan Väst (Suécia): Eng.^a Ana Catarina Ferreira da Silva Magalhães



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Setembro de 2017

Resumo

As forças envolvidas em “Friction Stir Welding” (FSW) são elevadas, de tal forma que os robôs industriais, hoje comumente utilizados para execução deste tipo de soldaduras, sofrem deflexões nas suas juntas, o que provoca desvios na sua trajetória, que deixa de passar na linha de junta, como programado. Estes desvios provocam a diminuição da qualidade da soldadura, o que implica que o componente final criado possua propriedades mecânicas não aceitáveis para a sua aplicação.

Diferentes soluções foram consideradas e uma delas insuficiente mas já desenvolvida, foi analisada neste texto. Posteriormente foi selecionada uma solução e deu-se lugar ao seu desenvolvimento.

No presente texto é documentado o desenvolvimento de um equipamento e programa computacional capazes de detetar a linha de uma junta de topo ou “butt joint” entre chapas destinadas a ser unidas por FSW, seja esta retilínea ou curvilínea, e calcular o desvio entre o centro da ferramenta e a linha de junta de soldadura.

Esta solução baseia-se em Visão Computacional, sendo que o equipamento desenvolvido consiste num conjunto de câmaras dispostas de forma a visualizar a área analisada a todos os momentos, seja qual for a forma no plano que a linha de junta apresente. O programa computacional desenvolvido é capaz de detetar a linha de junta, seja esta retilínea ou curvilínea, com elevada precisão e calcular o desvio entre o centro da ferramenta e a linha de junta a cada momento, permitindo assim que no futuro esta informação possa ser incluída no software de controlo do processo de FSW do robô industrial utilizado pelo departamento de Tecnologia de Produção da Högskolan Väst para o efeito.

As considerações de projeto tomadas no desenvolver desta solução estão documentadas neste texto, sendo acompanhadas pela apresentação dos resultados dos testes da mesma e da devida análise desses resultados. Foram desenvolvidos testes que comprovam a precisão, exatidão e robustez em relação à qualidade da soldadura, da solução, executando a deteção da linha de junta e calculando o respetivo desvio da ferramenta em troços retilíneos e curvilíneos, com passagem livre da ferramenta ou com execução de soldadura.

Abstract

The forces involved in FSW are high, in a way that industrial robots, nowadays commonly used for the execution of FSW welds, suffer deflections in their joints, which causes deviations in their trajectory, no longer passing through the joint line, as programmed. These deviations cause a decrease in the quality of the weld, which implies that the final component created possesses mechanical properties that are not acceptable for its application.

Different solutions were considered and an already developed solution, although insufficient, was analyzed in this text. Subsequently, a solution was selected and given place to its development. In the present text it is documented the development of an equipment and computer program capable of detecting the joint line between plates in Butt Joint configuration destined to be united by FSW, may these be rectilinear or curvilinear, and to calculate the deviation between the center of the tool and the welding joint line.

This solution is based on Computational Vision, and the developed equipment consists of a set of cameras arranged in order to visualize the analyzed area at all moments, in whatever form in the plane that the joint line presents. The developed computer program is able to detect the joint line with high precision and calculate the deviation between the tool center and the joint line at each moment, thus allowing in the future this information to be included in the process control software of the FSW industrial robot used by Högskolan Väst for this purpose.

The project considerations taken in the development of this solution are documented in this text, and these are accompanied by the presentation of the test results of the same and due analysis of the results.

The project considerations taken in the development of this solution are documented in this text, being accompanied by the presentation of the results of the tests and the proper analysis of the results. Tests have been developed to prove the accuracy, precision and robustness relative to the quality of the solution, of the solution, performing the joint line detection and calculating the respective deviation of the tool in straight and curvilinear sections, with free passage of the tool or with the execution of welding.

Agradecimentos

Gostaria em primeiro lugar de agradecer ao engenheiro Xiaoxiao Zhang por ter sido a pessoa que mais acompanhou o desenvolvimento deste projeto, sempre atento e de espírito altruísta e sempre disponível a qualquer dia e hora e por ter contribuído de forma indispensável para a criação do programa de software desenvolvido.

Aos meus colegas de trabalho da Höskolan Väst, Sudharshan Raman e Karthik Narayanan, que sempre me apoiaram dentro e fora do âmbito de trabalho e mostraram um forte interesse em acompanhar o desenvolvimento do meu projeto, apreciando e elogiando o mesmo a cada passo percorrido. Por todo o carinho e alegria que deles senti, todos os dias.

A todos os colegas de trabalho que de alguma forma contribuíram para o meu projeto, seja na fabricação de componentes, preparação de amostras, formação fornecida e sugestões ofertadas.

Ao meu orientador Fernando Gomes de Almeida, por todos os esclarecimentos e pela orientação na escrita desta dissertação.

À FEUP, ao programa “ERASMUS +”, à Höskolan Väst e designadamente à minha coorientadora Ana Catarina Ferreira da Silva Magalhães pela oportunidade de realizar este projeto de dissertação na Suécia, em instalações de qualidade e com pessoas com know-how relacionado com este projeto. Agradeço também o apoio financeiro fornecido pelo programa “ERASMUS +” e pela Höskolan Väst, sem o qual não teria sido possível para mim ter tido esta experiência.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e fizeram tudo para que me fosse possível chegar aqui e que demonstraram total interesse na minha vida académica, além do carinho diário que deles recebi.

Por fim, gostaria de agradecer à minha namorada, Fernanda Dias da Silva, que me acompanhou nesta viagem para a Suécia e me apoiou todos os dias, de todas as formas que eu poderia imaginar.

Índice

Resumo.....	i
Abstract.....	iii
Agradecimentos	v
Índice	vii
Notação	ix
Lista de Figuras.....	xi
Lista de Gráficos.....	xii
Lista de Tabelas.....	xiii
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do projeto e motivações	1
1.2 Projeto “Research towards a robotic friction stir welding of 3D components” da Högskolan Väst.....	1
1.3 Objetivos do projeto.....	3
1.4 Método seguido no Projeto	4
1.5 Estrutura da dissertação	7
2 Friction Stir Welding	9
2.1 Vantagens de FSW	9
2.2 Etapas do processo.....	10
2.3 Parâmetros do processo	11
3 Estado da arte	13
3.1 Sistemas de compensação de trajetória testados em FSW	14
3.1.1 Modelos de Controlo de Deflexão.....	14
3.1.2 Controladores baseados em medição de grandezas prontamente disponíveis.....	15
3.1.3 Encoders Secundários	15
3.2 Sistemas de deteção de posição integrados em FSW	16
3.2.1 Vantagens e desvantagens de sistemas de laser:	17
3.2.2 Vantagens e desvantagens de sistemas de Visão Computacional:	18
3.3 Outros sistemas de deteção de posição	19
3.3.1 Sistemas de compensação de posicionamento utilizando eixos de movimento externos	19
3.3.2 PSD e IBVS	20
3.3.3 Radar detector de movimento por microondas Doppler	20

3.3.4	Sistema de câmara estacionária de olho de peixe	20
3.3.5	Outros modelos matemáticos.....	21
4	Descrição detalhada do problema	23
4.1	Análise de soluções previamente desenvolvidas no Departamento	25
4.2	Seleção do tipo de solução	28
4.3	Requisitos do sistema (equipamento + programa):	28
4.4	Limitações na execução do projeto	29
5	Descrição detalhada da solução proposta.....	31
5.1	Solução final desenvolvida.....	31
5.1.1	Suporte	31
5.1.2	Câmaras e lentes	35
5.1.3	Iluminação	36
5.1.4	Programa de software desenvolvido	36
5.2	Considerações na seleção das câmaras	38
5.2.1	Tipo de sensor	38
5.2.2	Tipo de sinal	40
5.2.3	Formato do sensor	40
5.2.4	Interface	40
5.2.5	Resolução e Frame rate.....	41
5.3	Considerações no projeto do suporte	42
5.4	Considerações no desenvolvimento do Software	48
5.5	Cálculo do desvio.....	52
5.6	Calibrações	53
5.6.1	Calibração das câmaras.....	53
5.6.2	Distorção da imagem	54
5.6.3	Calibração do software.....	58
6	Teste do software desenvolvido	61
6.1	Precisão de detecção.....	61
6.2	Teste dinâmico do programa desenvolvido (sem execução de soldadura)	62
6.3	Teste dinâmico do programa desenvolvido (com execução de soldadura)	66
6.3.1	Influência da qualidade da soldadura na detecção da linha de junta	67
6.4	Resumo de resultados de precisão e exatidão	69
7	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	71
	Referências.....	73

Notação

CMOS – Complementary Metal-Oxide Semiconductor

CCD – Charged Coupled Device

FSW – Friction Stir Welding

IBVS – Image-Based Visual Servo

KS - Kernel Size

MES - Minimum Edge Strength

MESNR - Minimum Edge SNR

PSD – Position Sensitive Detector

PTC – Production Technology Center

TCP – Tool Center Point

TWI – The Welding Institut

WD – Working Distance

Lista de Figuras

Figura 1 – Célula robótica com o modelo ESAB Rosio FSW – Departamento de Tecnologia de Produção, Höskolan Väst. Imagem fornecida pelo Departamento de Tecnologia de Produção da Höskolan Väst....	2
Figura 2 – Soldadura FSW de duas chapas metálicas em configuração "Butt Joint" de junta retilínea – em https://za.pinterest.com/pin/408912841142585093/	3
Figura 3 – Componentes principais e direções de movimento envolvidos em FSW [4].....	11
Figura 4 – Esquema construtivo da solução de encoders secundários desenvolvida pela FANUC – retirada de http://www.fanuc.eu/ch/en/robots/accessories	16
Figura 5 – Sensores de imagem e laser para Visão Computacional (De Backer et al, 2012).	17
Figura 6 – Ferramenta de FSW - http://www.esab.com/automation/en/process/fsw/Tools.cfm	24
Figura 7 – Imagem capturada pela câmara do sistema de visão anteriormente instalado [5].	26
Figura 8 – Suporte das câmaras.....	31
Figura 9 – Ângulo de ajuste " α ".....	32
Figura 10 – Linha representativa da junta de soldadura curvilínea.....	32
Figura 11 - Posições de ajuste no suporte de uma câmara.	33
Figura 12 – Suporte de câmaras montado na árvore da ferramenta de FSW.	34
Figura 13 – Câmara utilizada - modelo "ELP-USBFHD05M-RL12" em http://www.elpcctv.com/highspeed-60fps-hd-usb-camera-module-usb20-ov2710-color-sensor-mjpeg-format-36mm-lens-p-225.html	35
Figura 14 – Anel de iluminação LED utilizado.	36
Figura 15 – Interface com o utilizador do programa desenvolvido.....	37
Figura 16 – Detecção sem erros numa soldadura com rebarba.....	38
Figura 17 – Espectro de absorção de diferentes sensores de imagem.....	39
Figura 18 - Simulação de distância focal necessária, efetuada no website da empresa "IDS-Imaging".....	43
Figura 19 - Pirâmide de imagem, simplificada – vista 1.....	45
Figura 20 - Pirâmide de imagem, simplificada – vistas 2 e 3.....	45
Figura 21 - Pirâmide de imagem distorcida "real".	46
Figura 22 – Ambiente de desenvolvimento do LABVIEW - Parte do programa desenvolvido relativo à imagem de uma das câmaras.	48
Figura 23 - Interface com o utilizador do programa desenvolvido.	49
Figura 24 - Detecção dos dois lados de uma linha de junta de espessura não nula.	50
Figura 25 - Seleção da área a inspeccionar pelo programa de deteção de linha de junta.....	50
Figura 26 – Momento de transição entre câmaras na deteção de uma linha de junta curvilínea.....	51
Figura 27 - Determinação das coordenadas do centro da ferramenta.	54
Figura 28 - Equipamento para teste da distorção de imagem.....	55
Figura 29 - Pontos detetados no teste de distorção de imagem.	56
Figura 30 – Gráfico "pixel vs Intensidade de escala de cinzas" de uma área detetada utilizando um operador kernel.....	59
Figura 31 - Partes constituintes da placa de teste utilizada. Linha de contacto representa a linha de junta.....	63
Figura 32 - Linha detetada aproximadamente retilínea, num troço curvilíneo.	65
Figura 33 - Soldadura FSW com moderada quantidade de rebarba e respetiva representação temporal do valor do desvio.	67
Figura 34 - Soldadura FSW com elevada quantidade de rebarba e respetiva representação temporal do valor do desvio.	67

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Resultados das medições da deflexão sofrida pelas juntas 2 e 3 com aproximação linear e “avançada” da característica da deflexão do eixo 2 [5].	26
Gráfico 2 - Medições feitas para um ângulo de 30° entre a linha de junta e a linha de referência colocada na esquadria sob a mesa móvel, com incrementos de 0,1 mm.	62
Gráfico 3 - Gráfico de detecção do troço linear da linha de junta.	63
Gráfico 4 - Gráfico de detecção do troço curvilíneo da linha de junta.	64

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela-resumo de valores de precisão e exatidão da medição do desvio.	69
---	----

1 Introdução

1.1 Enquadramento do projeto e motivações

Esta dissertação foi realizada no departamento de “Tecnologia de Produção” da “Högskolan Väst” e o seu tema é “Desenvolvimento de um sistema de Visão Computacional para a medição de desvios de trajetória em “Friction Stir Welding””.

Este tema surgiu no âmbito de um projeto deste departamento que tem como objetivo a melhoria da qualidade e repetibilidade das soldaduras executadas com a técnica “Friction Stir Welding”, referida neste texto, daqui em diante, como “FSW”.

1.2 Projeto “Research towards a robotic friction stir welding of 3D components” da Högskolan Väst

Högskolan Väst é uma universidade da Suécia, situada na cidade Trollhättan. O seu principal foco educacional, assim como de investigação científica, é a tecnologia de produção. Para isso possui instalações de investigação científica de alta qualidade e extremamente bem equipadas, situadas na zona industrial da cidade de Trollhättan, num edifício nomeado “Production Technology Center” ou “PTC”, local onde foi desenvolvido este projeto de dissertação.

O Departamento de Tecnologia de Produção da Högskolan Väst investe no desenvolvimento de técnicas de produção para a indústria, sendo as suas principais áreas de foco as seguintes¹:

- “Thermal Spray”, que é um processo de revestimento de superfície de materiais;
- Soldadura;
- Corte de chapa;
- Estampagem de chapa;

¹ Fonte: <https://www.hv.se/en/research/production-technology/>, consulta a 08/2017

Este projeto de dissertação enquadra-se no projeto-mãe “Research towards a robotic friction stir welding of 3D components”, que pretende diminuir as incertezas na trajetória de soldaduras FSW, causadas por deflexões existentes nas juntas do robô que as executa, por forma a no futuro ser possível executar, com repetibilidade, soldaduras de qualidade em trajetórias 2D ou 3D.

Na unidade de robótica deste departamento existe investigação na área de FSW, que se tem prendido na melhoria do controlo do processo, com foco especial na compensação do desvio da ferramenta em relação à linha de junta e no controlo de temperatura do processo.

Na Figura 1 está representada a célula robótica destinada a FSW do Departamento de Tecnologia de Produção da Höskolan Väst, que contém um robô industrial “ESAB Rosio FSW Robot”, baseado no modelo ABB IRB-7600, que possui uma capacidade de carga de 500 kg e utiliza o controlador IRC5.



Figura 1 – Célula robótica com o modelo ESAB Rosio FSW – Departamento de Tecnologia de Produção, Höskolan Väst. Imagem fornecida pelo Departamento de Tecnologia de Produção da Höskolan Väst.

Todo o projeto foi desenvolvido em torno deste robô, sendo que os equipamentos desenvolvidos foram pensados para ser incorporados no mesmo e todas as experiências foram desenvolvidas com o mesmo.

1.3 Objetivos do projeto

Este projeto teve como objetivo principal o desenvolvimento de um equipamento e respetivo programa de software de visão computacional, que deveriam ser capazes de detetar a linha de junta entre duas placas em configuração de topo ou “Butt Joint”, junta esta que pode ser retilínea (como apresentado na Figura 2) ou curvilínea. O segundo objetivo seria o de medir a distância entre a linha de junta e o centro da ponta da ferramenta instalada num robô industrial, preparado para FSW, durante o processo de soldadura.

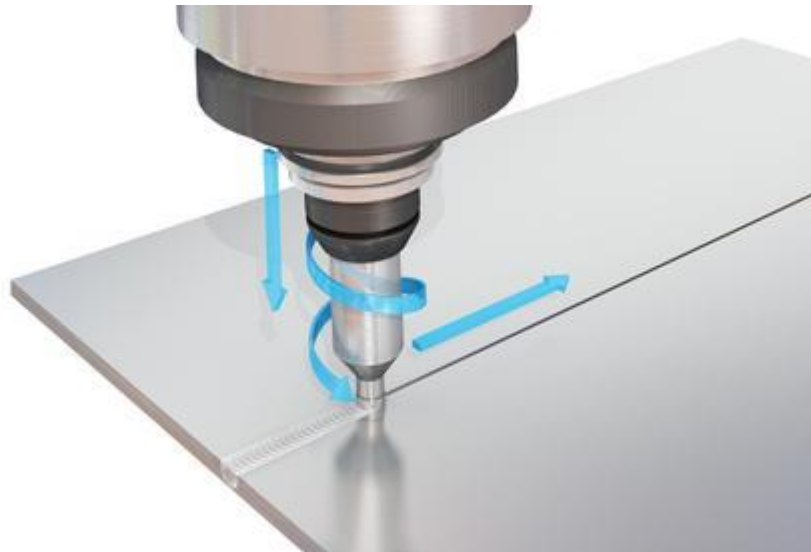


Figura 2 – Soldadura FSW de duas chapas metálicas em configuração "Butt Joint" de junta retilínea – em <https://za.pinterest.com/pin/408912841142585093/>.

O intuito do desenvolvimento deste sistema é, após o término desta dissertação, o departamento de tecnologia de produção da Högskolan Väst integrar a leitura deste equipamento na malha de controlo do processo que está ativa durante cada soldadura, para compensação do desvio de trajetória. Pretende-se que, com essa integração, o valor do desvio da ferramenta em relação à linha de junta seja tido em conta pelo controlador de movimento do robô, por forma a compensar a sua trajetória em tempo real, durante a soldadura, e desta forma obter soldaduras de melhor qualidade.

Note-se que devido à duração do estágio que enquadrava este projeto, o objetivo principal contemplava apenas o desenvolvimento do equipamento e do programa de detecção da linha de junta. A detecção deveria ser feita com suficiente precisão, no entanto seria esperado que após o término do estágio fosse necessário o departamento em questão continuar o desenvolvimento desta solução para que fosse calculado o desvio com exatidão, nas zonas retilíneas e curvilíneas da junta de soldadura, para posteriormente integrar essa leitura na malha de controlo de processo. Foi ainda possível, no âmbito deste projeto, desenvolver este cálculo.

1.4 Método seguido no Projeto

Etapas pré-projeto:

- Reconhecimento do espaço de trabalho, identificação dos recursos disponíveis e familiarização com os mesmos;
- Formação
 - Curso de Robótica com o objetivo de ser capaz de manipular robôs industriais do fabricante ABB, assim como programar on-line e off-line os mesmos robôs, utilizando os seus controladores ou o software RobotStudio num PC;
 - Tutorial online de LABVIEW.
- Identificação e análise do problema do projeto, incluindo estudo das soluções já desenvolvidas no passado no departamento em questão e quais as suas limitações;
- Definição dos requisitos que a nova solução deve cobrir;
- Estudo introdutório relativamente a FSW;
- Pesquisa do estado da arte relativamente ao tema proposto;
- Apresentação de propostas de novas soluções;
- Seleção da solução a desenvolver.
 - A proposta de solução a desenvolver consiste num equipamento de suporte de 4 câmaras, dispostas em torno da ferramenta do manipulador industrial com igual desfazamento angular entre si, de forma a que a cada momento, pelo menos uma das 4 câmaras seja capaz de visualizar de forma nítida a linha de junta entre duas placas em configuração “Butt Joint”, na área em frente à ferramenta, durante FSW;

- Este equipamento deve vir acompanhado de um programa computacional capaz de detetar a linha de junta com precisão e calcular o desvio entre esta o centro da ferramenta utilizada, a cada momento.

Etapas do projeto:

- Levantamento geométrico do conjunto de equipamentos intervenientes durante a soldadura, existente no departamento onde este projeto foi executado;
 - Desenho tridimensional em software CAD (Autodesk Inventor 2017);
- Pesquisa e estudo relativamente a visão computacional;
- Tradução dos requisitos do projeto em requisitos de hardware;
 - Requisitos mínimos das câmaras e lentes a selecionar, assim como do equipamento de suporte das mesmas;
- Desenho tridimensional do equipamento de suporte das câmaras, em software CAD;
- Seleção das câmaras, lentes e iluminação a encomendar;
 - Processo iterativo;
 - Desenvolvimento de um ficheiro de cálculo dos parâmetros das câmaras e lentes, necessários para cumprir os requisitos de projeto, tendo em conta a posição e orientação das mesmas no suporte projetado;
- Fabrico do equipamento de suporte;
- Instalação das câmaras e suporte das mesmas no robô industrial a utilizar;
- Teste do funcionamento das câmaras;
 - Calibração dos parâmetros ajustáveis da câmara;
- Seleção do software a utilizar para desenvolvimento do programa de deteção da linha de soldadura;
- Desenvolvimento do programa de deteção da linha de junta e cálculo do desvio;
 - Experimentação das câmaras;
 - Testes de deteção e sua repetibilidade, para diferentes orientações da câmara relativamente à linha de junta, tanto para linhas retas como para linhas curvas (robustez relativamente à orientação da câmara);
 - Calibração das câmaras;

- Determinação da posição do centro da ferramenta;
- Desenvolvimento do algoritmo de cálculo do desvio em análise;
- Desenvolvimento de uma interface com o utilizador, onde é possível ler as medições feitas a cada momento por todas as câmaras em simultâneo e registar as leituras;
- Teste do programa desenvolvido, em percursos retilíneos e curvilíneos, sem execução de soldadura;
- Procura de parâmetros de FSW que forneçam diferentes qualidades de soldadura;
- Teste do programa desenvolvido, em percursos retilíneos e curvilíneos, com execução de soldadura;
- Análise da resolução, precisão e exatidão da deteção e do cálculo do desvio;
- Análise da robustez do programa de deteção, variando a qualidade da soldadura;

Como marcos importantes de controlo do desenvolvimento do projeto podem-se distinguir:

1. A análise do problema e das soluções concebidas anteriormente a esta dissertação, assim como estudo dos temas abrangidos nesta dissertação e necessários ao desenvolvimento da mesma;
 - Cursos de robótica e LABVIEW;
 - FSW;
 - Visão computacional (incluindo parâmetros de câmaras e lentes, entre outros);
2. Seleção das câmaras, lentes e iluminação a comprar, desenho e fabricação do equipamento de suporte e instalação de todo o equipamento no robô que executa a soldadura;
3. Desenvolvimento e teste do programa de deteção da linha de junta e de cálculo do desvio, para linhas retas;
4. Desenvolvimento e teste do programa de deteção da linha de junta e de cálculo do desvio, para linhas curvas;

1.5 Estrutura da dissertação

No Capítulo 2 faz-se uma breve introdução ao processo de união de chapa utilizado durante esta dissertação e ao qual a investigação desenvolvida se destina.

Em seguida, no Capítulo 3, apresenta-se os desenvolvimentos existentes na temática de compensação de desvio da trajetória em FSW, devido à deflexão de robôs industriais quando as forças em jogo são demasiado elevadas.

No Capítulo 4 apresenta-se uma análise do problema e de soluções previamente desenvolvidas no departamento em questão, exploração das soluções possíveis, seleção do tipo de solução a desenvolver, definição de requisitos para essa solução e limitações globais na execução do projeto.

No Capítulo 5 apresenta-se a solução proposta, apresentando partes integrantes da mesma e analisando todas as considerações de projeto no decorrer do desenvolvimento da mesma. O capítulo termina ainda com a apresentação das calibrações necessárias executar antes de utilizar o sistema desenvolvido, para garantir o correto funcionamento do mesmo.

No Capítulo 6 apresentam-se e analisam-se os resultados dos testes efetuados à solução desenvolvida.

Por fim, no Capítulo 7, tiram-se conclusões e exploram-se possíveis abordagens à continuação e melhoramento da solução aqui apresentada, assim como para a continuação do projeto global onde este projeto de dissertação se insere.

2 Friction Stir Welding

O processo “Friction Stir Welding” (FSW) foi desenvolvido em 1991 [1], no centro de investigação de processos de soldadura “TWI”, no Reino Unido. Este é um processo de união entre dois elementos que podem ser do mesmo material ou de materiais diferentes (geralmente chapas metálicas), que se baseia no contacto de uma ferramenta não consumível em rotação a elevada velocidade (500-5000 rpm)¹ sobre os dois componentes metálicos a unir. A combinação da deformação plástica do material e a fricção que se origina deste contacto, origina calor que irá tornar o material mais fácil de deformar plásticamente. A ferramenta em rotação passa na zona de contacto entre as duas chapas a unir, unindo-as através dessa mesma deformação plástica causada. Não é adicionado qualquer tipo de material externo aos elementos a unir, como é feito no caso das soldaduras convencionais. Além disso, não existe fusão de material, integrando-se na categoria de “Soldadura em Estado Sólido” [2], e as forças em jogo são bastante elevadas, podendo ultrapassar as capacidades de carga máximas recomendadas pelos fabricantes de robôs industriais de grande porte (10-80 kN).

2.1 Vantagens de FSW

Apresentam-se em seguida algumas vantagens de utilizar soldadura com o processo FSW em vez de outros processos comumente utilizados²:

- Soldadura realizada em estado sólido, abaixo da temperatura de fusão dos materiais a soldar, o que facilita a união de materiais que são difíceis de unir com soldadura no estado líquido, como é caso das ligas de alumínio das séries 2000 e 7000, magnésio e cobre;
- Não utilizar arco elétrico nem produzir fumos;
- As soldaduras criadas não possuem porosidade;

¹ Fonte: <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-processes/friction-stir-welding/twi-fsw-systems>, consulta a 03/2017.

² Fonte: <http://www.twi-global.com/capabilities/joining-technologies/friction-processes/friction-stir-welding/benefits-and-advantages/> consulta a 03/2017.

- Excelentes resultados nos ensaios de fadiga, tração e flexão dos materiais soldados;
- É capaz de soldar espessuras superiores a 75mm numa só passagem;

Estas vantagens têm levado a uma crescente investigação deste processo e a sua crescente utilização nas indústrias aeroespacial, construção naval, ferroviária e rodoviária.

2.2 Etapas do processo

Tipicamente, FSW pode ser descrito em quatro passos [3]:

- **Plunging;**
 - O pino da ferramenta é pressionada na direção descendente, enquanto a ferramenta está em rotação, até que penetre por completo as placas a soldar e o “shoulder” contacte com a placa.
- **Dwelling;**
 - A ferramenta mantém a sua posição, mantendo-se a rotação constante, enquanto a temperatura aumenta, até que a temperatura desejada para a soldadura seja alcançada.
- **Welding;**
 - A ferramenta em rotação move-se ao longo da junta de soldadura, misturando mecânicamente o material, formando uma soldadura em estado sólido.
- **Retraction;**
 - O pino é retirado do material, deixando um orifício (key-hole), no final.

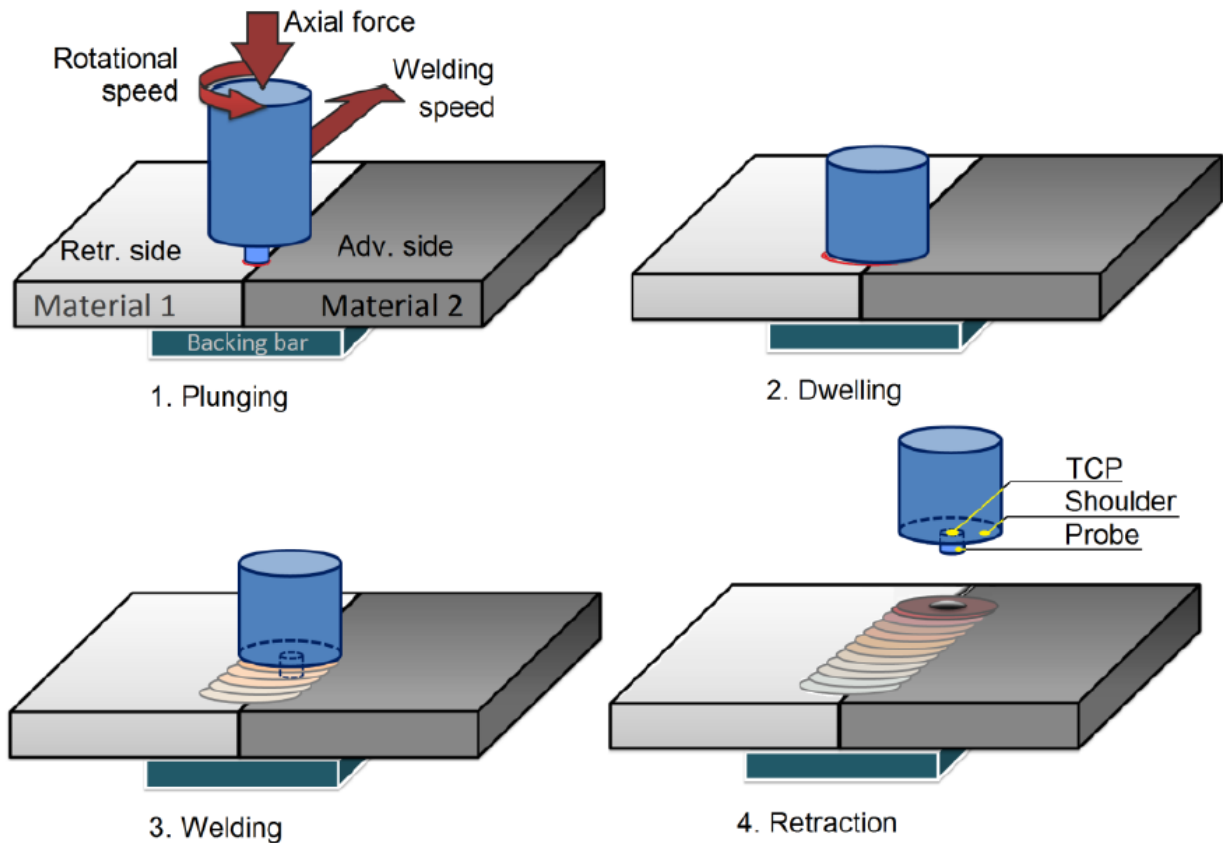


Figura 3 – Componentes principais e direções de movimento envolvidos em FSW [4].

2.3 Parâmetros do processo

As principais forças a ter em consideração em FSW são [5]:

Força transversal;

- Força ao longo da direção da junta de soldadura. Esta é função da resistência dos materiais a unir e da velocidade de avanço da ferramenta (quanto maior a velocidade de avanço, maior a força transversal observada).
- Força axial;
 - Força na direção perpendicular à placa a soldar para garantir o contacto entre esta e a ferramenta rotativa.

- Força lateral;
 - Perpendicular às forças axial e transversal. É causada pela assimetria existente na soldadura, causada pela combinação das velocidades de avanço e de rotação. De um dos lados da ferramenta ambas as velocidades têm o mesmo sentido (“advancing side”) e do outro lado as velocidades têm sentidos opostos (“retreating side”). Verificar a Figura 3 para distinguir o “advancing side” do “retreating side”.
- Binário;
 - Resultante do atrito entre a ferramenta e as placas a soldar. Quanto maior o atrito e maior a área de contacto, maior o binário resultante. O motor associado à ferramenta rotativa deve ser capaz de manter a velocidade de rotação aproximadamente constante.

Desta forma, no controlo do processo é necessário controlar os seguintes parâmetros:

- Velocidade de avanço;
- Velocidade de rotação;
- Força de penetração / Força axial;
- Geometria da ferramenta;
- Espessura das placa a soldar;
- Resistência dos materiais a soldar;

Opcionalmente, pode-se também controlar a temperatura da placa ou a binário resistente na ferramenta, uma vez que a resistência dos materiais varia com a variação da temperatura.

3 Estado da arte

Métodos de compensação de trajetória têm sido utilizados extensivamente para corrigir erros no seguimento de trajetórias programadas, devido à baixa rigidez de sistemas robóticos [6]. Métodos de compensação que tenham sido utilizados para processos de maquinagem podem também ser implementados para FSW.

Até à atualidade, a maioria das compensações de posição requerem informação relative ao estado real da posição das juntas do robô ou da sua ferramenta e como tal utilizam-se comumente sensores ou equipamentos que permitam obter esta informação.

A diferença entre a posição real das juntas de ligação de robôs industriais sujeitos a forças exteriores elevadas e a posição das mesmas prevista pelo controlador do robô tem de ser considerada [7].

No entanto, atualmente não é ainda comum a incorporação vinda de fábrica de sensores que forneçam o estado completo das posições reais das juntas do robô.

Alternativamente, a posição das juntas pode ser calculada através da medição das forças externas aplicadas no robô, se a rigidez do robô for conhecida. Para tal é necessária a utilização de sensores de força que são caros e frágeis, o que compromete a adequabilidade da sua integração em soluções de produção industrial.

São então ainda limitadas as soluções existentes para o problema em questão, tendo havido até à data pouca investigação na área de compensação de trajetória de robôs industriais de juntas flexíveis, em respeito à aplicação específica para FSW.

Apresentam-se então em seguida soluções documentadas no passado em torno desta temática.

3.1 Sistemas de compensação de trajetória testados em FSW

3.1.1 Modelos de Controlo de Deflexão

Em “Feedback Control of Robotic Friction Stir Welding” [4], um modelo de controlo de deflexão foi criado para corrigir a posição do TCP durante FSW.

O valor das forças aplicadas na ferramenta, medidas pelo sensor de força instalado no robô estático, foram registadas e usadas para calcular os binários de junta, multiplicando essas forças pelas distâncias das mesmas às juntas, e então esses binários foram relacionados com os valores dos ângulos medidos nas juntas (que correspondiam às deflexões nas juntas, uma vez que os motores das juntas estavam inativos), chegando-se a uma correlação matemática. Usando cinemática de robôs industriais tradicional, as deflexões angulares eram traduzidas em valores de deflexão em coordenadas cartesianas. Assim, era possível calcular os desvios no espaço de juntas, em vez de calcular no espaço cartesiano, e por isso, os valores de deflexão passaram a ser independentes da configuração espacial do robô.

Este modelo foi utilizado para corrigir a trajetória do robô, em tempo real, diminuindo significativamente o valor do desvio. Uma soldadura linear de duas chapas de alumínio da liga AA7075, em configuração “Butt Joint”, foi executada com os seguintes parâmetros:

- Diâmetro do pino da ferramenta: 3 mm;
- 2 kN de força axial, que resultou numa força lateral variável entre 1,8 kN and 2 kN;
- Espessura das chapas de alumínio: 3mm;

O desvio máximo da ferramenta relativamente à linha de junta foi reduzido de 1,62 mm to 0,55 mm, devido à utilização deste modelo de deflexão.

O valor do desvio está dentro da gama de valores aceitáveis, uma vez que é menor do que $\frac{1}{4}$ do diâmetro do pino. Ainda assim, as forças laterais em jogo durante a soldadura, podem ultrapassar os 5kN, em casos extremos, dependendo do material a unir e da espessura do mesmo. Isto significa que o valor da deflexão seria provavelmente bastante superior, ultrapassando o valor máximo admissível.

Esta solução parece promissora e merece uma análise mais profunda no âmbito deste projeto.

3.1.2 Controladores baseados em medição de grandezas prontamente disponíveis

Em [7], foram investigados os efeitos da utilização de três diferentes controladores, entre eles um observador não-linear em tempo discreto, no desvio obtido m soldaduras FSW retilíneas e curvilíneas, em placas de alumínio de 6mm de espessura. Estes controladores utilizam apenas medições da intensidade de corrente que passa nos motores do robô e medições da sua posição, através dos valores angulares das suas juntas, grandezas prontamente disponíveis para leitura, sem necessidade de instalação de novos sensores tipicamente caros.

Os resultados obtidos foram bastante promissores, sendo que para trajetórias retilíneas, o menor desvio máximo obtido em relação à linha de junta foi de cerca de 78 μm e 0,62 mm para trajetórias curvilíneas, o que são valores extremamente positivos, uma vez que o desvio máximo admissível pode ir até um quarto do diâmetro do pino, que para uma placa a soldar de 6mm tem tipicamente um diâmetro de 5,5 mm, o que implicaria um desvio máximo admissível de 1,375 mm.

Conclui-se desta forma que a implementação de novos controladores não lineares pode ser uma solução adequada ao problema de compensação de desvio de trajetória de robôs industriais durante FSW.

3.1.3 Encoders Secundários

O fabricante de robôs industriais FANUC® desenvolveu uma solução baseada em “encoders” secundários, capaz de diminuir consideravelmente a diferença entre a posição real do TCP do robô e a posição programada. A solução construtiva está apresentada na Figura 4.

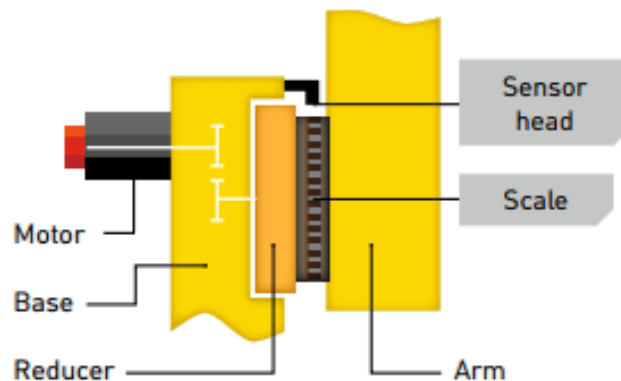


Figura 4 – Esquema construtivo da solução de encoders secundários desenvolvida pela FANUC – retirada de <http://www.fanuc.eu/ch/en/robots/accessories>.

Esta solução utiliza um segundo conjunto de encoders que mede deflexões causadas pelo binário e pressão aplicados na ferramenta e aplica uma compensação a esses desvios, controlando a posição do robô a baixas velocidades ou na sua posição final. A medição das deflexões sofridas em cada junta é determinada a partir da diferença entre o valor do encoder primário instalado no motor de uma junta e o valor do respectivo encoder secundário instalado no exterior dessa junta.

Estes encoders são também capazes de identificar vibrações e amplitudes rotação da junta mais rapidamente do que os encoders primários, permitindo um controlo rápido e preciso da vibração e overshoot, assim como compensação do efeito de backlash.

3.2 Sistemas de deteção de posição integrados em FSW

Em [8] e [4], uma câmara industrial e um sensor de laser, como vistos na 5, foram utilizados para medir o desvio da ponta da ferramenta do robô relativamente à linha de junta entre as placas a unir pelo processo FSW. A exatidão da medição do desvio é provada por comparação entre as medições de ambos os sensores, cujas medições têm valores semelhantes durante a fase estabilizada da soldadura.

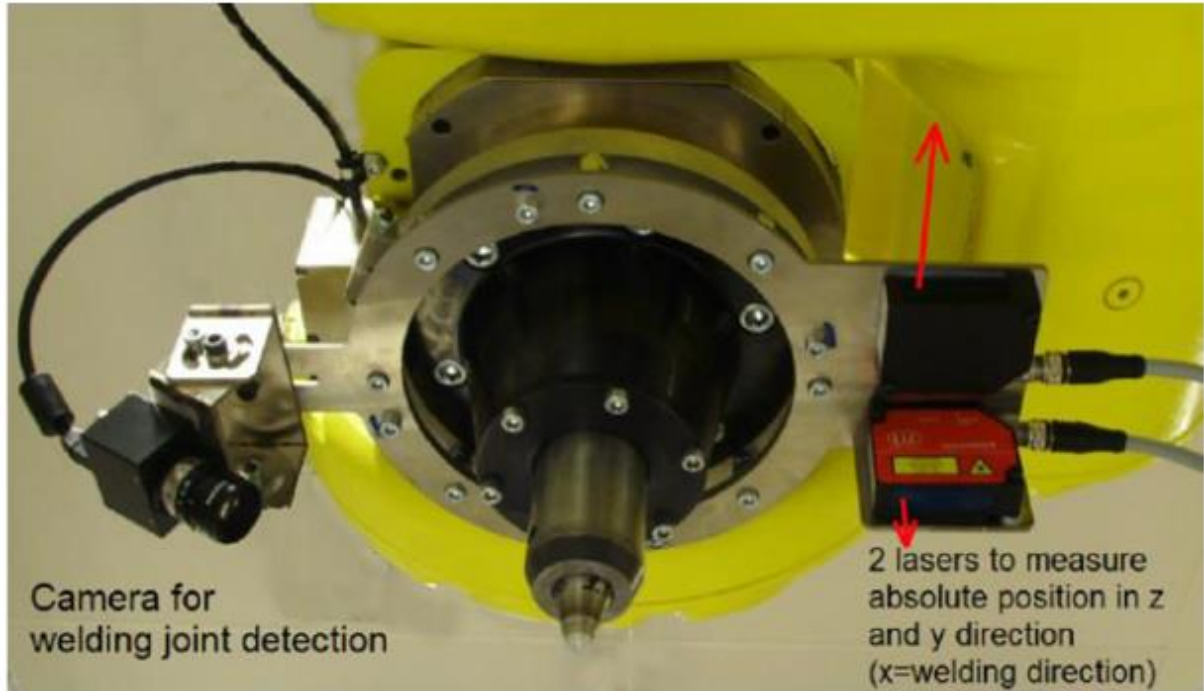


Figura 5 – Sensores de imagem e laser para Visão Computacional (De Backer et al, 2012).

As leituras obtidas foram utilizadas para entender de que forma as forças externas aplicadas na ferramenta do robô influenciavam a deflexão do robô durante uma soldadura FSW linear.

3.2.1 Vantagens e desvantagens de sistemas de laser:

- Vantagens:
 - Muito precisos e exatos;
 - Sensíveis a desvios angulares da ferramenta em relação à direção vertical;
- Desvantagens:
 - Necessitam de um plano de referência, que pode ser bastante difícil de implementar na maioria dos casos práticos, especialmente se a trajetória percorrida pela ferramenta for bidimensional e curvilínea;
 - Não é possível garantir a perpendicularidade entre este e o percurso percorrido, num percurso curvilíneo;

No caso particular deste projeto, desvios angulares da ferramenta (até 8°) não causam consequências relevantes na qualidade da soldadura e não é provável que os desvios angulares de valores próximos de 8° ocorram, deixando de ser uma vantagem a sensibilidade aos desvios angulares por parte do sensor de laser [4]. Por este motivo e devido às desvantagens mencionadas, conclui-se que os sensores de laser não são adequados para medir o desvio de trajetória, no caso deste projeto.

3.2.2 Vantagens e desvantagens de sistemas de Visão Computacional:

- Vantagens:
 - Não necessitam de planos de referência ou qualquer outro equipamento de referência;
 - Dependendo do posicionamento da câmara ou da quantidade de câmaras utilizadas, podem detetar curvas e seguir trajetórias bidimensionais ou tridimensionais;
- Desvantagens:
 - Têm de ser calibrados cada vez que a posição e orientação das câmaras for alterada;
 - São fortemente influenciados pela iluminação ambiente;
 - Necessitam de uma linha de junta visível, o que significa que nem todos os tipos de configurações de junta podem ser utilizados.

Uma vez que este projeto apenas considera soldaduras com configuração “Butt Joint”, este método é considerado adequado a ser aplicado neste projeto.

3.3 Outros sistemas de detecção de posição

3.3.1 Sistemas de compensação de posicionamento utilizando eixos de movimento externos

Em [9] propõe-se a utilização de uma sistema de visão com captura de imagem a alta velocidade, aliado com um mecanismo de compensação de posição a alta velocidade colocado na extremidade do robô industrial, alterando o TCP para uma nova posição na extremidade deste subsistema de compensação. Este sistema híbrido permite de facto obter compensações de posicionamento do TCP do robô extremamente precisas. No entanto, no caso apresentado, o subsistema de compensação de posição só é capaz de responder a alta velocidade por possuir um atuador de alta velocidade e por esse subsistema ter pequena massa e pequena rigidez em comparação com o restante robô. Estas condições não são aceitáveis no caso de se executar uma soldadura FSW, pois o subsistema não é de todo capaz de comportar as forças em jogo na FSW. É possível no entanto aproveitar a ideia de utilização de um subsistema de compensação de posicionamento que poderá ser externo ao robô industrial em vez de estar acoplado a este.

Com o sistema proposto em [9], o TCP do robô teria uma posição compensada em tempo real pelo sistema de compensação que estaria a comprometer a rigidez do elemento que segura a ferramenta montada no robô e que permite a realização da soldadura. Em alternativa, poder-se-ia utilizar uma sistema de posicionamento no espaço do componente a soldar e fazer esse sistema de posicionamento compensar a posição relativa que se pretende que o TCP do robô e a peça a soldar tenham. Assim, em vez de se focar exclusivamente na posição exata do TCP, pode-se focar na posição relativa entre o TCP e a peça a soldar, que na verdade é o que é verdadeiramente crucial para uma soldadura correta. Seria necessário um sistema de posicionamento com mais eixos de movimento, o que acresce o custo da solução e aumenta o grau de complexidade do controlo do sistema global, já que o número de eixos de movimento do sistema global vem acrescido.

3.3.2 PSD e IBVS

Em [10], os autores desenvolveram um sistema de sensorização da posição do robô, utilizando tecnologia laser, que permite a calibração do posicionamento de robôs industriais com um erro máximo de 20 μm .

Um sistema de calibração não é adequado para resolver o problema de deflexão das juntas de manipuladores robóticos em FSW. Mesmo que fosse utilizado um sistema deste tipo para ajustar a posição do robô simultaneamente à execução da soldadura, seria necessário um alvo visível pelo sistema de visão a todos os momentos. Isto pode-se provar difícil em soldaduras em trajetórias bidimensionais ou tridimensionais.

3.3.3 Radar detector de movimento por microondas Doppler

Em [11] foi desenvolvido um detetor de posição de baixo custo que se baseia num radar de microondas Doppler, capaz de detetar a posição de um robô industrial durante a sua operação.

Esta solução só foi provada para controlo de posição em trajetórias unidireccionais e aparenta ser ineficiente em trajetórias 2D. Tem ainda o inconveniente de ser um equipamento demasiado complexo para ser implementado de forma a que o robô se possa mover livremente no seu espaço de trabalho e executar soldaduras tridimensionais.

3.3.4 Sistema de câmara estacionária de olho de peixe

Em [12] é utilizado um sistema de câmara estacionária de olho de peixe para estimar a posição do robô durante a sua operação.

Para este tipo de sistemas de visão por câmaras, onde a câmara é posicionada relativamente longe do ponto que se pretende medir, ou o equipamento não terá resolução suficiente ou terá um custo demasiado elevado. Deste modo, esta não é uma solução adequada.

3.3.5 Outros modelos matemáticos

Em [13] e [14] são referidos alguns métodos puramente matemáticos, geométricos e computacionais que permitem o desenvolvimento de algoritmos de controlo para compensação de posicionamento ou trajetória do robô mas estes não se encontram preparados para lidar com não linearidades causadas por deflexões indesejadas nas juntas do robô, causadas pela existência de forças elevadas durante FSW e baixa rigidez dos robôs industriais.

De qualquer forma, o uso de algoritmos de controlo matemáticos pode ser positivo uma vez que não necessita de utilizar equipamento extra, como sensores e atuadores, para compensar o posicionamento do robô. Permite também diminuir o custo da solução, porque no caso de se querer implementar a solução em vários robôs, o algoritmo pode ser reproduzido sem custo e integrado em todos eles, enquanto que no caso de a solução desenvolvida for baseada num equipamento, tem de se fabricar uma unidade do equipamento para cada robô utilizado.

Existe alguma investigação relativa à compensação da trajetória de robôs industriais tendo em conta a deflexão sofrida durante processos que impliquem elevadas forças e deflexão acentuada das juntas dos robôs industriais, no entanto poucas soluções foram implementadas em FSW, sendo então o trabalho desta dissertação de elevada relevância.

4 Descrição detalhada do problema

Para a união de peças de geometria complexa, utilizando FSW, é necessário utilizar uma máquina que possua pelo menos 5 eixos de movimento. Por este motivo faz-se hoje uso dos robôs industriais, que são comumente utilizados e que muitas vezes já existem instalados nas unidades fabris. Estes robôs industriais não são rígidos o suficiente para acomodar as forças exercidas durante o processo FSW sem que sofram deflexão nas suas juntas, que são as zonas de menor rigidez, em especial os seus redutores (tipicamente do tipo “harmonic drive”). Desta forma, a leitura dos encoders instalados nos motores das mesmas não corresponde à configuração real do robô industrial.

Uma vez que os softwares de simulação e geração de código de controlo dos robôs industriais assumem que os mesmos são infinitamente rígidos e que, no caso presente, essa assunção não pode ser aceite, existirão diferenças consideráveis entre a posição real do “Tool Center Point” (TCP) do robô e a posição que o controlador do robô espera que o mesmo TCP tenha, ao ler os valores dos ângulos das juntas do mesmo.

Estes erros de posição traduzem-se em desvios, durante a soldadura, da ferramenta relativamente à linha de junta entre os materiais a unir, o que provoca defeitos na soldadura por FSW e valores reduzidos das propriedades mecânicas do novo componente formado, que não são muitas vezes aceitáveis.

Em [5], foram unidas por FSW chapas de alumínio da liga AA 7075-T6 com espessuras entre 2 e 3,2 mm, em configuração “Butt Joint”, em linha reta. O desvio entre a linha de soldadura executada e a linha de junta entre as chapas metálicas foi medido utilizando um microscópio e foram realizados ensaios de tração aos produtos finais, para determinar a sua tensão de cedência.

Concluiu-se a partir desses testes que a tensão de cedência dos componentes se mantém aceitável para desvios da soldadura relativamente à linha de junta de até $\frac{1}{2}$ do diâmetro do pino da ferramenta utilizada. No entanto, verificaram-se defeitos na parte inferior dos componentes soldados, que diminuíam a resistência à fadiga dos mesmos e poderiam iniciar uma fenda que se poderia propagar, quando os desvios eram próximos de $\frac{1}{2}$ do diâmetro do pino. Por este motivo, o valor máximo do desvio, convencionou-se como sendo de $\frac{1}{4}$ do diâmetro do pino.

Para resolver este problema é necessário implementar uma solução capaz de compensar o desvio causado pela deflexão nas juntas do manipulador robótico. Duas propostas de solução passam por: desenvolvimento de um algoritmo de cálculo preditivo da posição real do TCP ou criação de sistemas de monitorização compostos por sensores, que determinem a posição do TCP com precisão e fornecimento do valor da posição calculada ou medida como feedback ao código de controlo do robô industrial, para que este ajuste a sua trajetória em tempo real.

Note-se que não se considera a opção de utilizar novos controladores, como foi feito em [7], porque no departamento em questão existe já trabalho desenvolvido em direção a ambas as propostas descritas acima e como tal existe já equipamento, software e know-how relacionado com as mesmas, em contraste com a área de controlo.

Na Figura 6 representa-se uma ferramenta de FSW e o seu pino.



Figura 6 – Ferramenta de FSW - <http://www.esab.com/automation/en/process/fsw/Tools.cfm>.

4.1 Análise de soluções previamente desenvolvidas no Departamento

Anteriormente à execução deste projeto de dissertação, foi desenvolvido no Departamento de Tecnologia de Produção da Högskolan Väst, um programa de controlo do processo, com um módulo de compensação do desvio, baseado na relação entre esse desvio e a deflexão das juntas do robô. Além disso, foram desenvolvidos dois equipamentos de medição em atuação simultânea, um sensor laser e uma câmara industrial.

Como primeira etapa deste projeto, foi feita uma análise do sistema já existente e foram detetadas as seguintes limitações:

- A câmara de medição utilizada não possuía resolução suficiente para detetar com precisão o desvio em causa. O tamanho de um píxel na imagem obtida era da mesma ordem de grandeza do desvio máximo de trajetória admissível;
 - Aproximadamente $\frac{70 \text{ mm}}{480 \text{ pixels}} \approx 0,15 \text{ mm}$ reais (ver Figura 7), por píxel da imagem obtida, sendo o desvio máximo admissível para um pino de 2mm de diâmetro (valor comumente utilizado) de 0,5mm;
- Era necessário soldar as placas em cima de um equipamento envolvente de paredes rígidas (Ver Figura 7), que serviam de referência para o sensor de laser. Isto limitava gravemente a dimensão das placas que se poderia soldar;
- Não era possível detetar linhas curvas;
 - O sensor de laser não o permite, pois não é possível garantir a perpendicularidade entre este e o percurso percorrido, num percurso curvilíneo;
 - Uma única câmara não é capaz de ter uma visão desimpedida da linha de junta, num percurso curvo, a todos os momentos;
- Programa de compensação de desvio:
 - O tempo de execução do programa era superior ao tempo de execução de “offset” ao percurso, por parte do controlador (130 ms para a execução do programa e 100 ms para offset do percurso);
 - Considera o efeito da gravidade e os binários de aceleração desprezáveis;
 - A relação binário aplicado e deflexão utilizada foi a mesma para todas as direções de avanço da ferramenta, quando na verdade só tinham sido feitos ensaios numa

direção e a resposta das juntas é muito diferente consoante a direção da força aplicada, como foi testado anteriormente em [5];

- Existe um efeito de “backlash” no arranque do robô (ver Gráfico 1);

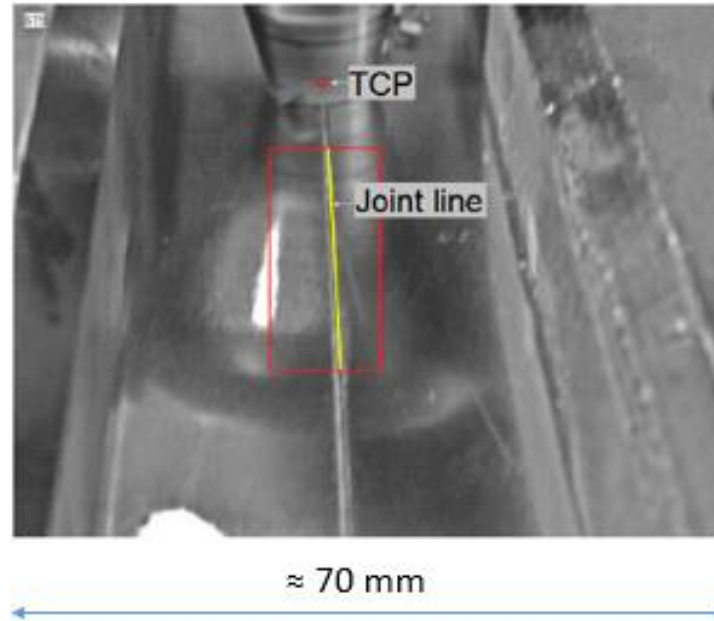


Figura 7 – Imagem capturada pela câmara do sistema de visão anteriormente instalado [5].

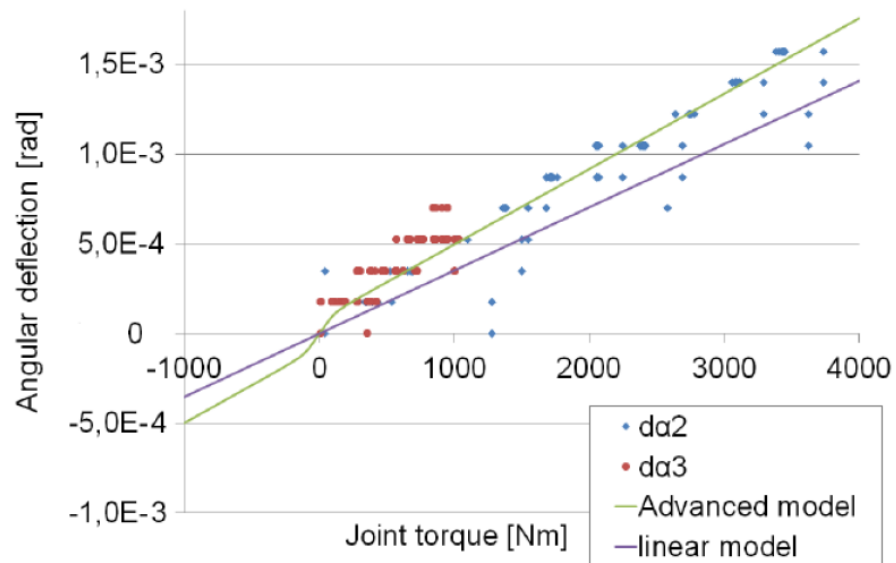


Gráfico 1 - Resultados das medições da deflexão sofrida pelas juntas 2 e 3 com aproximação linear e “avançada” da característica da deflexão do eixo 2 [5].

O conjunto de erros acumulados nas limitações referidas, tornam a solução existente até à data insuficiente para compensar o desvio de trajetória com precisão e exatidão.

Desta forma, esta situação motivou o lançamento de um projeto com o objetivo de ultrapassar as limitações referidas, de uma de duas formas possíveis: Melhorar o modelo de deflexão e respetivo programa de controlo, já existentes, ou desenvolver um novo equipamento de medição que permitisse medir externamente o desvio real entre a ferramenta e a linha de junta, para que mais tarde se possa utilizar essa medição no controlo de trajetória do robô, em tempo real;

Em seguida apresentam-se algumas vantagens e desvantagens em desenvolver um novo equipamento, ao invés de melhorar o modelo de deflexão e respetivo programa de controlo.

Vantagens:

- O valor do desvio medido por um equipamento externo será sempre mais exato do que o calculado com um modelo que foi construído sobre suposições simplificativas (como a não consideração da gravidade e binários de aceleração) e que ele próprio depende de medições, neste caso de força e deslocamento, e de correlações matemáticas provenientes de dados experimentais;
- O mesmo equipamento pode ser utilizado em vários robôs diferentes, sendo possível exportar esta solução para um novo robô, caso o departamento decida substituir o robô que utiliza por um outro modelo. O modelo de deflexão é específico para a dinâmica de um único modelo de robô industrial.
- Uma vez que existem direções e sentidos de soldadura preferenciais [4], que se traduzem em diferentes valores de desvios para o mesmo material e espessura de chapa, a utilização de uma solução não dependente da alteração de direção e sentido, irá poupar o trabalho de criar correlações matemáticas entre o desvio da soldadura e os valores lidos nos encoders, necessário caso se utilize um modelo de deflexão. Desta forma facilita-se a soldadura em qualquer percurso bidimensional ou tridimensional, além de em diferentes tipos de materiais e espessuras de chapa.

Devantagens:

- O equipamento ocupa espaço físico que poderá condicionar a complexidade geométrica da peça que é possível soldar. Isto deve ser tido em conta no desenvolvimento do mesmo;
- Qualquer equipamento tem um custo monetário associado (compra / fabricação), podendo eventualmente necessitar de manutenção;

4.2 Seleção do tipo de solução

Depois de analisadas as vantagens e desvantagens acima descritas, chegou-se à conclusão que seria mais adequado desenvolver um novo equipamento.

Uma vez que já existia know-how no Departamento de Tecnologia de Produção da Höskolan Väst, relativamente a sensores laser e câmaras utilizadas em visão computacional, era recomendado que a solução desenvolvida utilizasse um destes dispositivos.

Optou-se por utilizar câmaras para um sistema de visão computacional por ser aparentemente mais simples implementar uma solução de medição de desvios ao longo de trajetórias curvilíneas, com câmaras, quando comparada a uma solução com sensores de laser, cujas desvantagens foram já descritas na secção 3.2.1.

4.3 Requisitos do sistema (equipamento + programa):

- O atravancamento dimensional do equipamento deve ser tão reduzido quanto possível, de forma a não interferir com a soldadura de eventuais peças de geometria complexa;
- O equipamento deve ser de baixo custo;
- A instalação do equipamento deve ser fácil e rápida, tanto a nível do suporte de fixação das câmaras ao robô, como a nível de conexão com um qualquer computador que execute o software desenvolvido;
- A posição e orientação das câmaras deve ser ajustável;

- A soma dos tempos de aquisição de imagem, detecção da linha de junta e cálculo do desvio da ferramenta em relação à linha de junta deve ser inferior ao período de atualização do percurso do robô, executada pelo controlador do manipulador robótico.
- Tanto a precisão como a exatidão da medição devem ser inferiores a 0,1 mm;
- Deve ser possível detetar linhas retas e linhas curvas, num plano 2D;
- Deve ser possível guardar automaticamente o valor do desvio a cada momento, para análise posterior e para posteriormente a este projeto ser possível utilizar como feedback no controlo de posição da ferramenta do robô, para diminuição do desvio de trajetória.

4.4 Limitações na execução do projeto

Existiam as seguintes limitações na execução do projeto em questão:

- O 6º eixo do manipulador robótico foi desacoplado pela empresa ESAB para integrar a ferramenta rotativa de FSW;
 - Isto implica que a informação da orientação da árvore de suporte da ferramenta não está disponível ao utilizador, sendo que a solução desenvolvida neste projeto não pode necessitar desta informação (como seria no caso de se desenvolver, por exemplo, um dispositivo de alinhamento da câmara com a linha de junta).
- Os produtos a comprar devem estar dentro do orçamento do projeto e devem ter tão baixo custo monetário quanto possível;
- A análise do problema, aprendizagem do necessário para o desenvolvimento da solução, o projeto da solução, sua criação, implementação e teste da mesma, deve ser feita num tempo total de 4 meses e meio.

5 Descrição detalhada da solução proposta

A solução desenvolvida consistiu num conjunto de 4 câmaras desfasadas de 90° em torno do eixo que atravessa o centro da ferramenta e por um programa de deteção da linha de junta e cálculo do desvio da ferramenta relativamente a essa linha de junta, desenvolvido com auxílio da “Image Acquisition Toolbox” do software “LABVIEW®”.

5.1 Solução final desenvolvida

5.1.1 Suporte

O conjunto de 4 câmaras foi montado num suporte projetado no âmbito deste projeto. O suporte possui encaixes para 4 câmaras e permite o ajuste livre do ângulo α , ângulo entre o eixo que passa no centro da lente com o eixo que passa no centro da ferramenta, como se pode ver na Figura 9. O suporte criado pode ser visto na Figura 8.

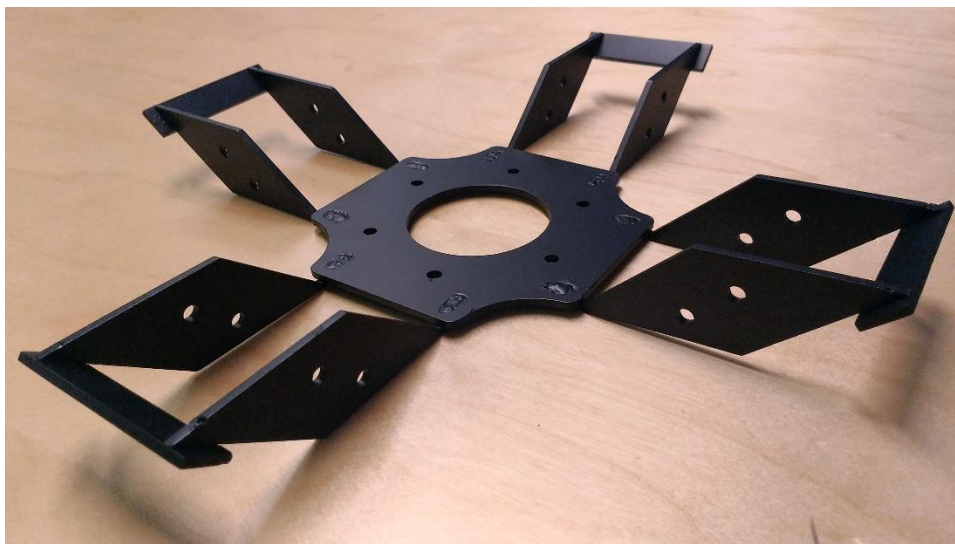


Figura 8 – Suporte das câmaras.

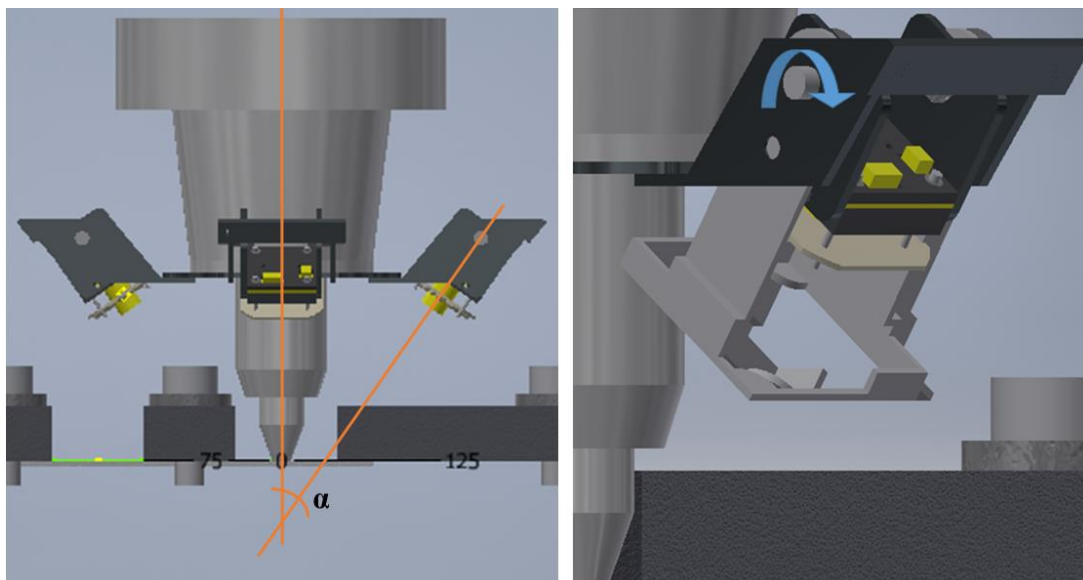


Figura 9 – Ângulo de ajuste "α".

Foram utilizadas apenas 3 câmaras pois esse foi o número de câmaras funcionais disponíveis no momento de testar a solução desenvolvida. Este número é o suficiente para provar o conceito que se pretende provar uma vez que três câmaras são o suficiente para detetar, sem obstruções, uma soldadura FSW executada numa trajetória curvilínea não fechada como a representada na Figura 10. No entanto, para ser capaz de detetar qualquer trajetória curvilínea, será necessário instalar a quarta câmara quando o departamento pretender continuar o desenvolvimento desta solução, no futuro.

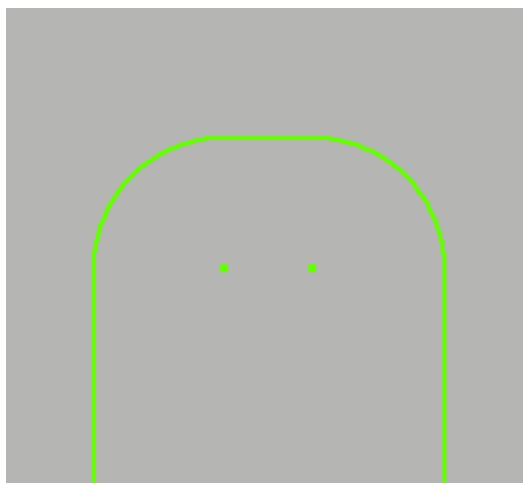


Figura 10 – Linha representativa da junta de soldadura curvilínea.

A distância da câmara à mesa de trabalho, onde se executam as soldaduras, pode ser ajustada discretamente, já que existem, em cada haste do suporte, duas posições possíveis para o acoplamento de cada câmara, afastadas entre si de 20 mm numa direção inclinada de $31,3^\circ$ relativamente à direção vertical (ver Figura 11).

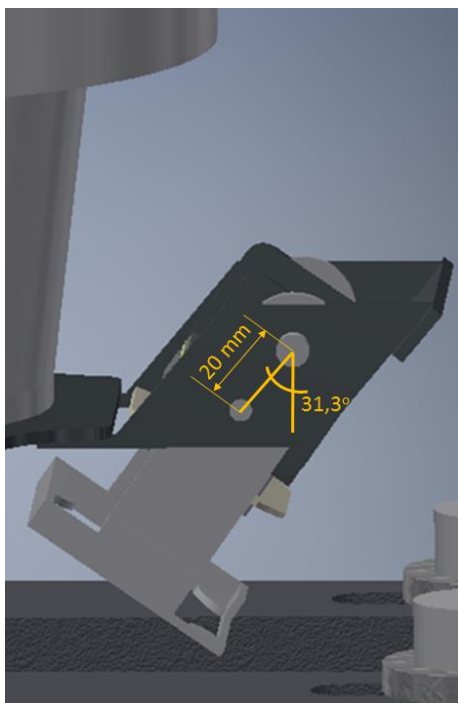


Figura 11 - Posições de ajuste no suporte de uma câmara.

A possibilidade de variação da orientação da câmara e da sua distância ao objeto observado, foi implementada para que o mesmo suporte possa ser utilizado mesmo que se utilize uma ferramenta de comprimento diferente ou caso se pretenda alterar a área inspeccionada.

Este suporte foi fixo por parafusos à árvore da ferramenta de FSW instalada no robô, através dos furos existentes no seu anel central, como apresentado na Figura 12.

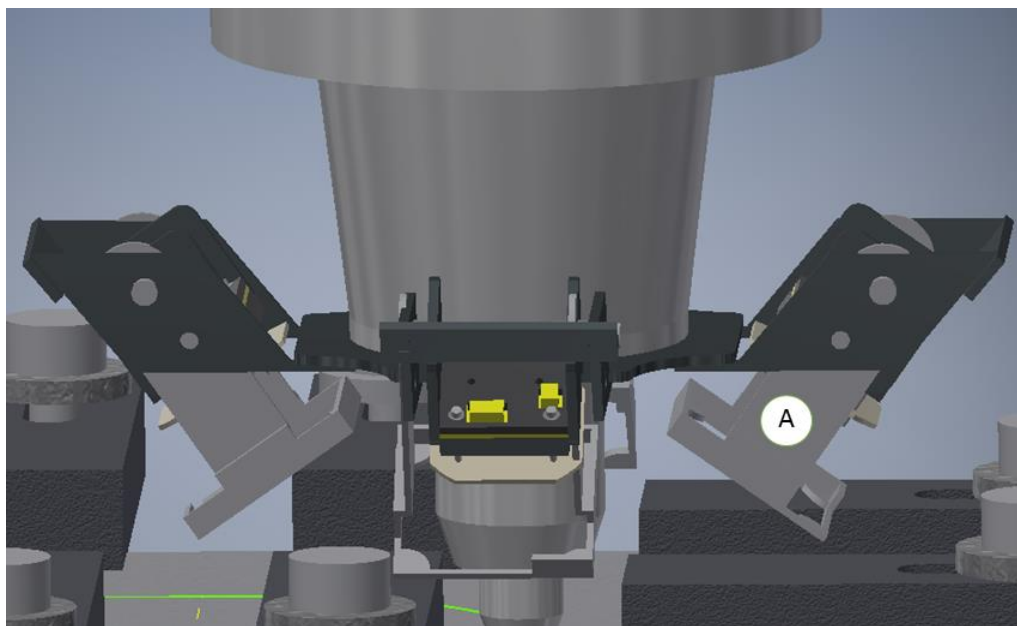


Figura 12 – Suporte de câmaras montado na árvore da ferramenta de FSW.

Podemos ainda ver assinalado com a letra “A”, na Figura 12, um suporte para anéis de iluminação, produzido por impressão 3D.

5.1.2 Câmaras e lentes

As câmaras utilizadas são câmaras do modelo “ELP-USBFHD05M-RL12”, apresentado na Figura 13, e têm as seguintes principais características:

- Resolução: 1920x1080 píxeis;
- Frame rate máximo: 120 fps;
- Tipo de sensor: CMOS;
- Tipo de conexão: USB 2.0 High Speed;
- Dimensão do sensor: 1/2,7”;
- Sem focagem automática;

As lentes utilizadas possuem as seguintes características principais:

- Focus Length: 12 mm (levemente ajustável);
- Monofocal;
- Dimensões muito reduzidas (aproximadamente 20 mm de comprimento e 15 mm de diâmetro);



Figura 13 - Câmara utilizada - modelo “ELP-USBFHD05M-RL12” em <http://www.elpcctv.com/highspeed-60fps-hd-usb-camera-module-usb20-ov2710-color-sensor-mjpeg-format-36mm-lens-p-225.html>.

5.1.3 Iluminação

Foram utilizados anéis de LEDs, como os representados na Figura 14, e colocados em torno das câmaras, por forma a obter uma iluminação constante ao longo de todo o percurso de soldadura. Os anéis de iluminação utilizados iluminam o suficiente para não haver influência relevante por parte da iluminação ambiente, proveniente do laboratório onde as soldaduras são efetuadas.



Figura 14 – Anel de iluminação LED utilizado.

5.1.4 Programa de software desenvolvido

Foi desenvolvido um programa capaz de detetar a linha de junta das placas a soldar, sejam estas retilíneas ou curvilíneas, e calcular o desvio da ferramenta relativamente à linha de junta.

O software foi desenvolvido com auxílio da “Image Acquisition Toolbox” do software “LABVIEW”. Na Figura 15 podemos ver o interface com o utilizador, que exhibe a imagem de captura das câmaras, em tempo real, e gráficos relativos ao valor do desvio calculado ao longo do tempo, para cada câmara.

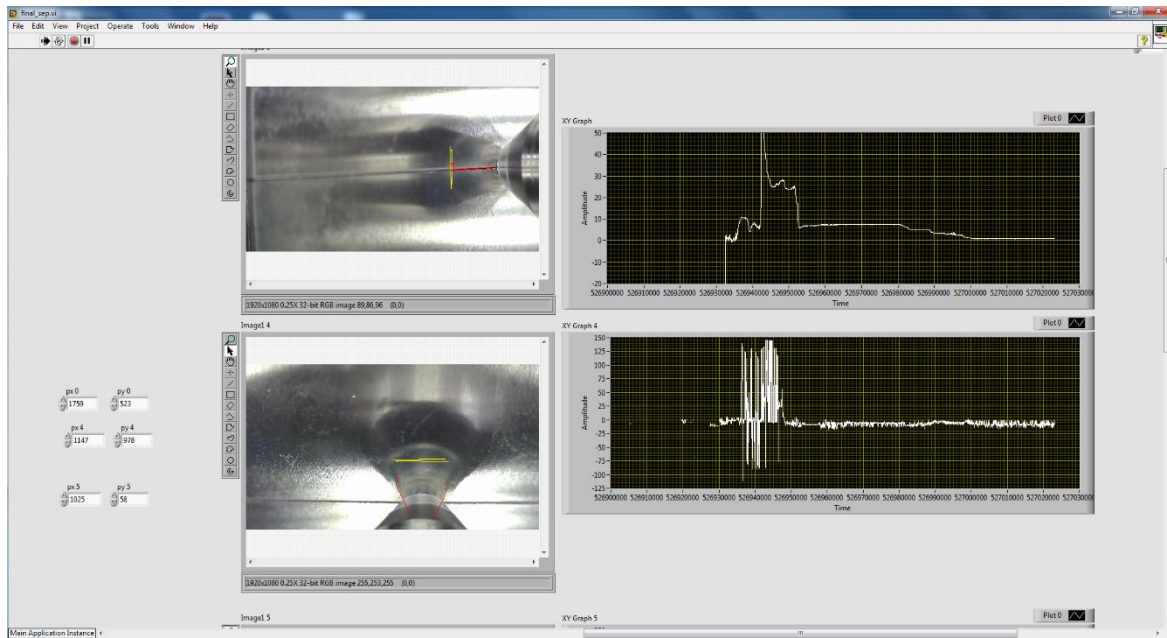


Figura 15 – Interface com o utilizador do programa desenvolvido.

Este programa possui um erro máximo de deteção relativamente à curva de regressão polinomial do gráfico obtido, de cerca de 0,2 píxeis no caso de juntas de soldadura em linha reta e 0,9 píxeis no caso de serem curvas. Estes valores foram obtidos ao traçar curvas de regressão polinomial dos dados registados nas folhas de cálculo Excel de cada medição, com grau do polinómio menor possível contanto que o valor de R^2 fosse superior a 0,96, e calculando a diferença máxima entre a curva de regressão e os valores de desvio obtidos. No caso do cálculo do desvio em linhas curvas, ainda que a precisão da deteção da linha seja suficiente, o valor calculado não é aceitável uma vez que o algoritmo de deteção utilizado, desenvolvido pela empresa LABVIEW, foi desenvolvido para deteção de linhas retas. No entanto, os dados em bruto obtidos a partir da leitura das câmaras, podem ser tratados por um algoritmo que seja desenvolvido no futuro, que tenha em conta a curvatura da linha a ser detetada.

O programa de deteção é robusto relativamente à qualidade da soldadura, podendo existir uma quantidade relativamente elevada de rebarba de soldadura, sem afetar a deteção da linha de junta, como podemos observar na Figura 16.

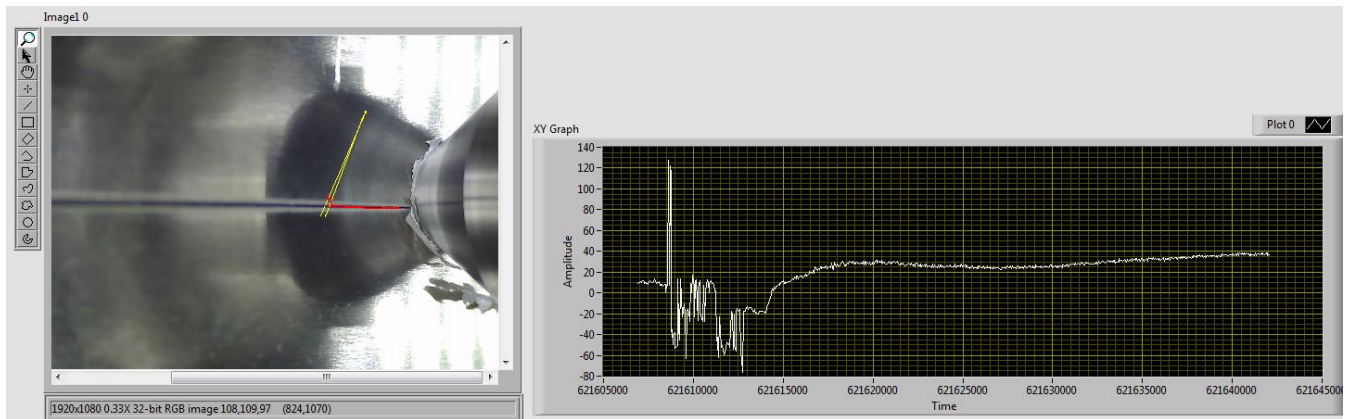


Figura 16 – Detecção sem erros numa soldadura com rebarba.

5.2 Considerações na seleção das câmaras

Considerando os requisitos da solução a desenvolver, apresentados na secção 4.3, foram seleccionadas as câmaras apresentadas na secção 5.1.2.

Em primeiro lugar, foi feita uma pesquisa relativamente ao tipo de câmaras utilizadas em Visão Computacional.

5.2.1 Tipo de sensor

Tipicamente as câmaras utilizadas em Visão Computacional podem ter sensores do tipo [15]:

- CCD;
- CMOS;
- Microbolometro;
- InGaAs.

Os sensores de microbolometro e de InGaAs não são adequados ao caso presente uma vez que o primeiro é utilizado para obter imagens térmicas e o segundo possui tipicamente uma resolução muito baixa ($< 640 \times 512$ píxeis) para o que se pretende nesta aplicação.

Entre sensores CCD e CMOS, os mais adequados serão os CMOS, uma vez que são capazes de converter os valores de tensão dos seus píxeis numa imagem digital a uma frequência consideravelmente mais elevada do que os sensores CCD e porque o ruído de sinal é também significativamente menor no caso dos sensores CMOS³.

Quanto ao espectro de recepção dos sensores, pretendia-se utilizar uma solução tão simples quanto possível, não necessitando utilizar filtros de luz, iluminação especial e dispendiosa, entre outras soluções que necessitassem de uma maior análise, tempo e dinheiro, reforçando a ideia que o pretendido seria a prova de conceito e não a realização de um equipamento que fosse ser diretamente utilizado a nível industrial, sem qualquer alteração.

Mais uma vez, o sensor do tipo CMOS provou ser extremamente adequado uma vez que este apresenta uma elevada absortividade na região visível do espectro, como se pode ver na Figura 17.

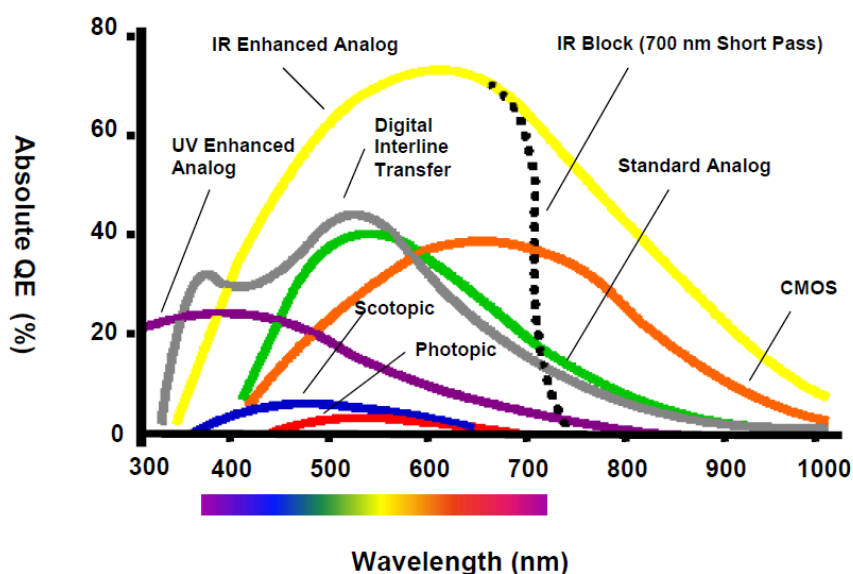


Figura 17 – Espectro de absorção de diferentes sensores de imagem.

Nos últimos anos tem sido feito um forte investimento na investigação e fabricação de sensores CMOS, que são hoje os sensores de imagem mais produzidos no mundo³ e utilizados em câmaras de telemóvel e em aplicações de Visão Computacional, por exemplo, e como tal podem ser encontrados a preços relativamente acessíveis.

Pelos motivos acima referidos, foi seleccionado o tipo de sensor CMOS.

³ Fonte: <https://www.teledynedalsa.com/imaging/knowledge-center/appnotes/ccd-vs-cmos/>, consulta a 03/2017

5.2.2 Tipo de sinal

Relativamente ao tipo de sinal, as câmaras podem ser analógicas ou digitais. Optou-se por câmaras digitais, uma vez que estas têm tipicamente maior resolução e maior frame rate e não são tão suscetíveis a ruído por interferência eletromagnética⁴.

5.2.3 Formato do sensor

Relativamente ao formato do sensor, as câmaras podem tipicamente ser de:

- Area Scan;
- Line Scan;

Foi selecionado um formato de sensor de “Area Scan” pois era necessário analisar uma área para ser possível detetar uma linha.

5.2.4 Interface

Quanto ao interface com o computador a conectar, podemos ter as seguintes opções:

- USB;
- Firewire;
- GigE;
- Camera Link;

Foi selecionado o interface USB, por ser mais universal e poder ser utilizado em qualquer computador no futuro, não sendo necessária nenhuma porta de interface que não é comum de encontrar em computadores regulares.

⁴ Fonte: <https://www.edmundoptics.com/resources/application-notes/imaging/camera-types-and-interfaces-for-machine-vision-applications/>, consulta a 03/2017

Seria ainda possível escolher entre uma solução de USB 2.0 High Speed ou USB 3.0, tendo-se optado pela primeira, uma vez que este formato permite ainda uma taxa de transferência de dados suficiente para transferir sem descontinuidades a imagem de vídeo obtida por uma câmara de resolução 1920x1080 píxeis, considerada suficiente para prova de conceito neste projeto.

Este tipo de interface é também o mais económico, o que é uma vantagem que vai de encontro aos requisitos de projeto.

5.2.5 Resolução e Frame rate

A câmara selecionada deveria permitir a seleção de diferentes combinações de Resolução/Frame rate, para permitir experimentação. Além do mais, a resolução a ser utilizada, deveria ser acompanhada por uma frame rate de valor superior à frequência de atualização da posição do TCP do robô, por parte do controlador do mesmo, sem aumento considerável do preço da câmara.

O facto de se ter optado por utilizar câmaras simples, que não foram desenhadas para ambiente industrial, permitiu reduzir o preço da solução e selecionar uma câmara com todas as características referidas acima, incluindo uma resolução de 1920x1080 píxeis, acompanhada de 30 fps de frame rate. Esta combinação de Resolução/Frame rate é suficiente para prova de conceito deste projeto. Para uma imagem total obtida por uma câmara, de 100 mm na sua maior dimensão (valor superior ao que se pretende para esta dimensão, neste projeto), uma resolução de 1920 píxeis significa que cada píxel representa $\frac{100}{1920} \approx 0,052 \text{ mm}$ da realidade capturada, o que é uma ordem de grandeza menor do que os valores típicos de desvio máximo admissível, sem compromisso das propriedades mecânicas de um componente soldado por FSW.

A taxa de atualização de posição do robô utilizado, por parte do seu controlador, quando se utilizam instruções de interrupção do tipo “xyCorr”, é de entre 5 e 10 Hz. Estes valores foram fornecidos por Jeroen De Backer, autor de publicações relevantes na área de compensação de trajetória de robôs durante FSW, que executou no passado testes relativos à frequência de atualização do controlador do robô utilizado no presente departamento da Höskolan Väst, tendo

também entrado contacto com a empresa ABB. Esta informação foi passada pessoalmente e não foi registada em suporte digital em nenhum documento criado por Jeroen De Backer.

Assim, é mais do que suficiente utilizar uma frame rate de 30 fps. Esta informação foi fornecida por diálogo direto com Jeroen De Backer, autor de alguns artigos e tese de doutoramento extremamente relevantes para este trabalho, cujas referências se encontram na secção respetiva deste texto.

5.3 Considerações no projeto do suporte

O suporte foi projetado de forma a que pudesse acomodar 4 câmaras, desfasadas de 90° entre si, em torno da ferramenta do robô que executa FSW. Este suporte deveria ser de dimensões tão reduzidas quanto possível para interferir o menos possível com qualquer soldadura que se pretenda executar no futuro. No entanto, este deve permitir o reposicionamento e reorientação manual das câmaras, devendo reservar espaço para o efeito.

Quando colocadas no suporte, as câmaras deveriam estar a uma distância da linha de junta de soldadura para que a área inspeccionada pudesse ser diminuta o suficiente para a resolução de medição ser elevada mas grande o suficiente para ser capaz de capturar uma curva na trajetória definida pela linha de junta. Ao mesmo tempo, as câmaras deveriam estar longe o suficiente da ferramenta para que não interferissem na soldadura de um componente de geometria não plana.

A combinação de distância da câmara à linha de junta e o tamanho da área inspeccionada pode ser adaptada pela “distância focal” da lente utilizada na câmara. Se possível, poder-se-ia colocar as câmaras a uma distância elevada da linha de junta e ajustar a área a ser inspeccionada, utilizando uma lente de elevada distância focal.

Após uma pesquisa concluiu-se que, para o tipo de câmara escolhida, as lentes disponíveis que eram de pequenas dimensões e de muito baixo custo, tinham no máximo 12 mm de distância focal, todas de valor fixo e uma distância mínima de focagem ao objeto a inspecionar de 100 mm.

Estes valores foram tidos em consideração no desenho do suporte das câmaras pois limitava as distâncias máxima e mínima a que as câmaras se poderiam posicionar área que pretendiam analisar. A distância mínima de focagem implica que as câmaras se deveriam posicionar a pelo

menos 100 mm da linha de junta enquanto que a distância focal limita a distância máxima, que vai depender dos parâmetros construtivos da câmara, como tamanho do sensor, e ângulos da pirâmide de imagem e também da escolha do tamanho da área a analisar.

Considerou-se que a área a analisar deveria ter aproximadamente 40 mm na sua menor dimensão.

Utilizando uma ferramenta desenvolvida pela empresa "IDS-Imaging" para simulação de parâmetros de lentes utilizadas em câmaras de Visão Computacional, concluiu-se que para uma distância de 100 mm entre a câmara e a área a analisar e para uma distância focal da lente de 12 mm, o tamanho dessa área já teria a sua menor dimensão ligeiramente superior a 40 mm, mas ainda dentro de um valor aceitável.

Note-se que os valores obtidos por esta simulação são apenas indicativos uma vez que são calculados tendo por base modelos de câmaras e lentes desenvolvidos pela empresa "IDS-Imaging". A simulação é feita selecionando modelos que pareciam adequados a utilizar neste projeto. Um cálculo geométrico, mais rigoroso, da área analisada por uma qualquer câmara selecionada, viria a ser feito posteriormente.

Na Figura 18 pode-se ver a simulação efetuada no website da empresa "IDS-Imaging".

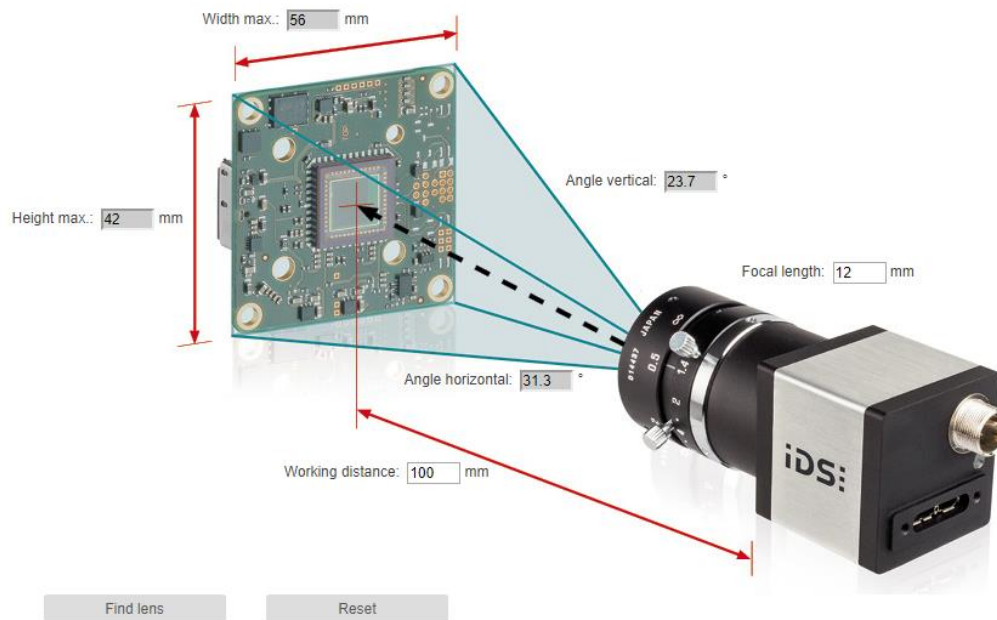


Figura 18 - Simulação de distância focal necessária, efetuada no website da empresa "IDS-Imaging".

Aumentando a distância entre a câmara e a área inspecionada, aumenta também o tamanho dessa área, para a mesma distância focal da lente utilizada. Uma vez que aumentar a distância focal seria apenas possível utilizando lentes de dimensão e preço consideravelmente maiores, optou-se por manter a câmara a uma distância tão próxima quanto possível de 100 mm em relação à área a inspecionar.

Convencionou-se que a distância em questão, chamada de “Working Distance” ou “WD”, é a distância entre o centro do sensor de imagem e o centro da base da pirâmide de imagem da câmara.

Decidiu-se então que existiriam no suporte duas posições possíveis para a câmara. Uma em que a câmara se situasse a cerca de 100 mm de altura, relativamente à placa (usando a ferramenta utilizada para executar as soldaduras neste projeto) e outra posição em que a WD fosse de 100 mm. Em ambos os casos, a área inspecionada deveria ser tangente à ferramenta.

Tendo em conta o tamanho da câmara e das lentes a serem utilizadas, a dimensão pretendida para a base da pirâmide, a WD pretendida e a tangência da base da pirâmide de imagem à ferramenta, calculou-se a o ângulo de inclinação que as câmaras deveriam ter relativamente à vertical (ângulo α). O ângulo calculado foi de $\alpha = 31,3^\circ$.

Uma vez que a pirâmide de imagem está distorcida devido à inclinação das câmaras e que o simulador dos parâmetros de lente utilizado não contém um modelo-tipo igual ao modelo do fabricante “Ailipu ELP” que foi selecionado para este projeto, foi desenvolvida uma folha de cálculo em Excel para cálculo das dimensões da área capturada pela câmara.

Para explicar o funcionamento dessa folha de cálculo, deve-se primeiro explicar quais as suposições feitas e quais as relações entre as variáveis utilizadas.

Em primeiro lugar, nas Figura 19 e Figura 20, apresenta-se a figura geométrica utilizada para calcular a relação entre variáveis geométricas.

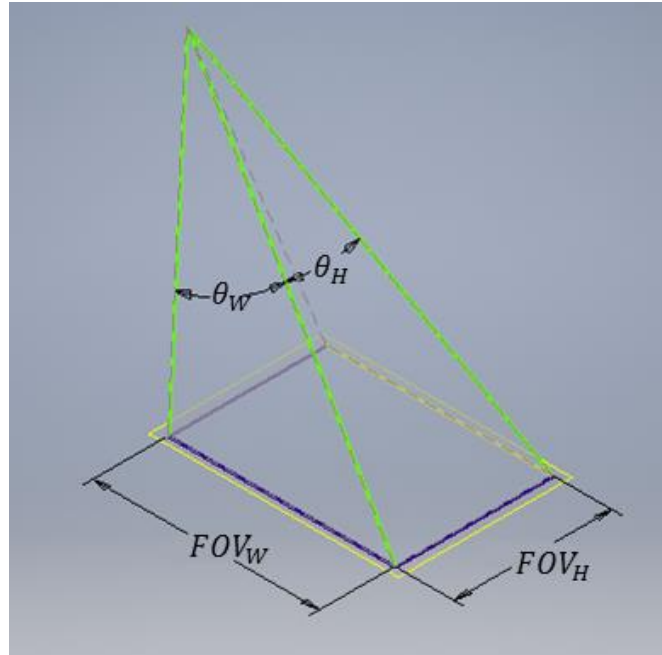


Figura 19 - Pirâmide de imagem, simplificada – vista 1.

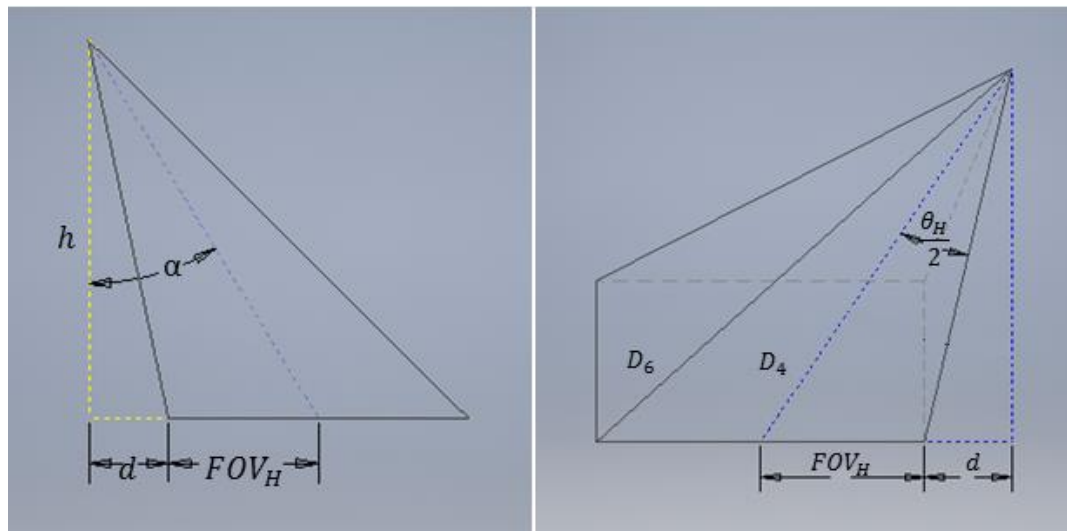


Figura 20 - Pirâmide de imagem, simplificada – vistas 2 e 3.

Note-se que a pirâmide real, analisada pelo sensor de imagem, teria a forma apresentada na Figura 21, sendo que a pirâmide apresentada na Figura 19 é simplificada e o comprimento dos lados da base da pirâmide simplificada têm o valor médio entre lados opostos da base da pirâmide real.

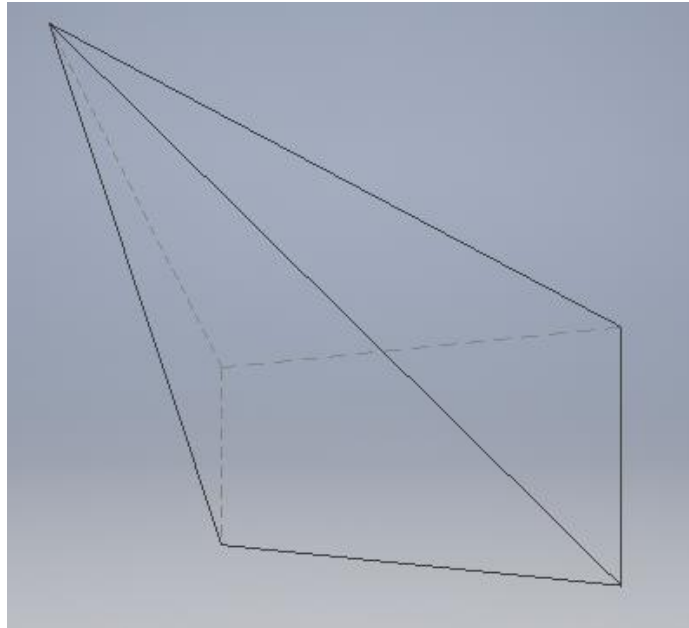


Figura 21 - Pirâmide de imagem distorcida "real".

Esta simplificação não terá consequências graves, uma vez que os valores das dimensões da área analisada, introduzidos na folha de cálculo, são apenas indicativos e irão diferir ligeiramente da realidade.

Em seguida expõem-se as equações de ótica utilizadas, retiradas de “Machine Vision Lens Fundamentals”⁴:

$$FL_{efetivo} = Mag \times WD \quad (5.4.1)$$

$$FL = \frac{Mag \times WD}{1 + Mag} \quad (5.4.2)$$

$$Mag = \frac{SS_H}{FOV_H(preendido)} \quad (5.4.3)$$

$$\theta_H = 2 \times Tan^{-1} \left(\frac{SS_H/2}{FL_{efetivo}} \right) \quad (5.4.4)$$

⁵ Fonte: <http://www.faraadid.com/Upload/file/Machine%20Vision%20Lez%20Fundamental.pdf>, consulta a 03/2017

Onde:

- FL – “Focus Length” ou “Distância focal”;
- Mag – Magnificação de imagem;
- WD – “Working Distance” – Distância do centro do sensor de imagem até ao centro da base da pirâmide de imagem;
- SS_H – “Sensor Size (Height)” – Dimensão do sensor;

Em primeiro lugar atribuem-se valores a α e FOV_H *pretendido* e colocam-se as dimensões do sensor utilizado. Com isto, será calculada a distância focal efetiva necessária para que estes valores atribuídos se verifiquem. Em seguida o valor da distância focal efetiva deve ser manualmente alterado para um valor que exista entre as hipóteses de lentes a adquirir.

Por fim, calcula-se o ângulo θ_H com a equação

$$\overline{\theta}_H = 2 \times \left(\sin^{-1} \left(\frac{FOV_H + d}{D_6} \right) - \sin^{-1} \left(\frac{FOV_H/2 + d}{D_4} \right) \right) \quad (5.4.6)$$

proveniente de relações geométricas retiradas da pirâmide simplificada, e calcula-se o mesmo ângulo com (5.4.5) e calcula-se o erro de cálculo de quando se utiliza a equação $\varepsilon_{\theta_H} = \frac{\overline{\theta}_H - \theta_H}{\theta_H} \times 100$. O valor de FOV_H é alterado iterativamente até que o erro calculado seja menor ou igual a 0,1%. Nesse momento, sabemos qual será o valor aproximado das dimensões da área real a ser inspecionada.

Com esta folha de cálculo, pôde-se efetuar ligeiros ajustes ao desenho do suporte, prevendo simultaneamente as dimensões finais da área de inspeção aproximada, até chegar à solução final.

O suporte final é constituído pelas seguintes partes:

- Anel de fixação ao robô;
- Abas de suporte das câmaras;
- Caixilhos das câmaras;
 - Protege as câmaras;
 - Possui abas que permitem a rotação das câmaras;
- Suporte de iluminação;

As peças constituintes do suporte foram todas produzidas por corte por jato de água, com exceção dos elementos dos caixilhos das câmaras, que estão em contacto com as mesmas, tendo estes últimos sido produzidos por impressão 3D. Os desenhos de definição de todas as peças encontram-se patentes no Anexo 1.

O anel de fixação ao robô e as abas de suporte das câmaras foram unidas por soldadura. Todas as restantes ligações foram aparafusadas.

5.4 Considerações no desenvolvimento do Software

Para desenvolver o software em causa utilizou-se a “Image Acquisition Toolbox” do LABVIEW pois este é um software de programação gráfica, o que permite a sua rápida aprendizagem e por ter um compilador interno, o que permite uma elevada velocidade de execução dos programas nele desenvolvidos, o que é crucial para este projeto.

Na Figura 22, pode-se ver uma parte do programa desenvolvido, no ambiente de desenvolvimento do LABVIEW, relativa à captura de imagem por parte de uma das três câmaras utilizadas, sua análise e cálculo do desvio. O programa completo pode ser visto no Anexo 2.

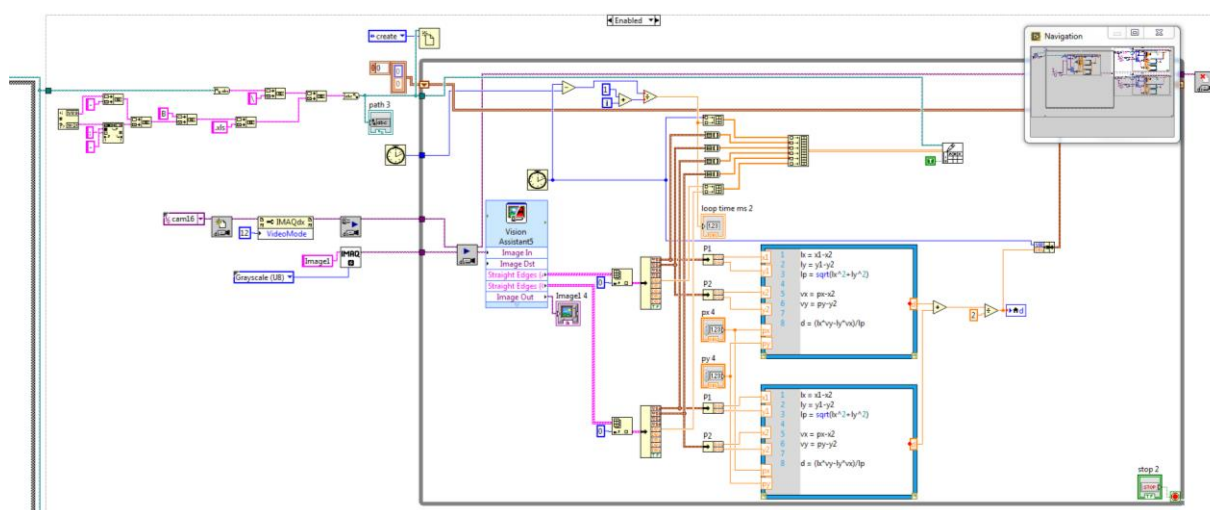


Figura 22 – Ambiente de desenvolvimento do LABVIEW - Parte do programa desenvolvido relativo à imagem de uma das câmaras.

Na Figura 23 pode-se ver parte do interface com o utilizador, do mesmo programa. Este permite a visualização da imagem das três camaras em simultâneo e dos gráficos que representam o valor do desvio ao longo do tempo, em píxeis.

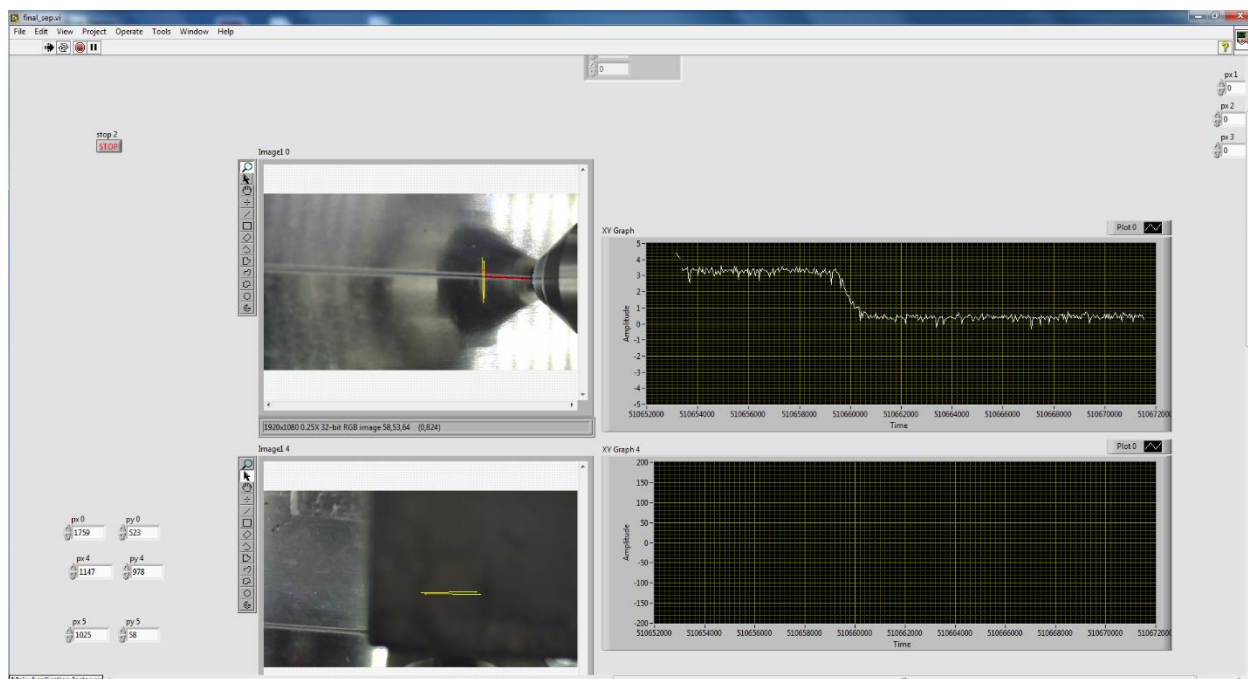


Figura 23 - Interface com o utilizador do programa desenvolvido.

Uma vez que a linha de junta na verdade é uma fenda com espessura não-nula, para cada câmara são utilizadas duas áreas de inspeção, cada uma encarregue de detetar um dos lados da fenda existente entre duas placas a unir, e a “linha de junta” é considerada o lugar geométrico que se encontra equidistante de ambas as linhas detetadas por cada uma das áreas de inspeção. Podemos ver esta situação representada na Figura 24.

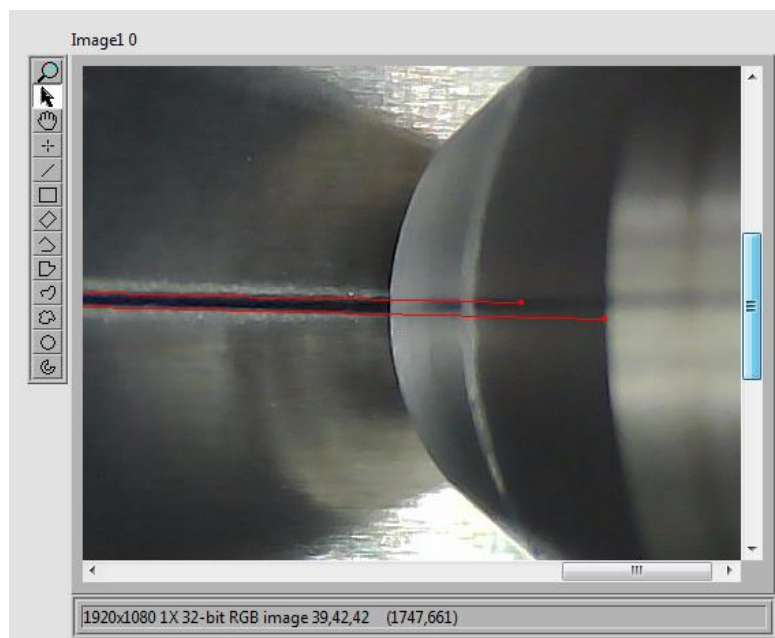


Figura 24 - Detecção dos dois lados de uma linha de junta de espessura não nula.

No programa utilizado, as áreas de inspeção para cada câmara, dentro das quais o algoritmo de detecção da linha de junta é executado, são selecionadas como exemplificado na Figura 25.

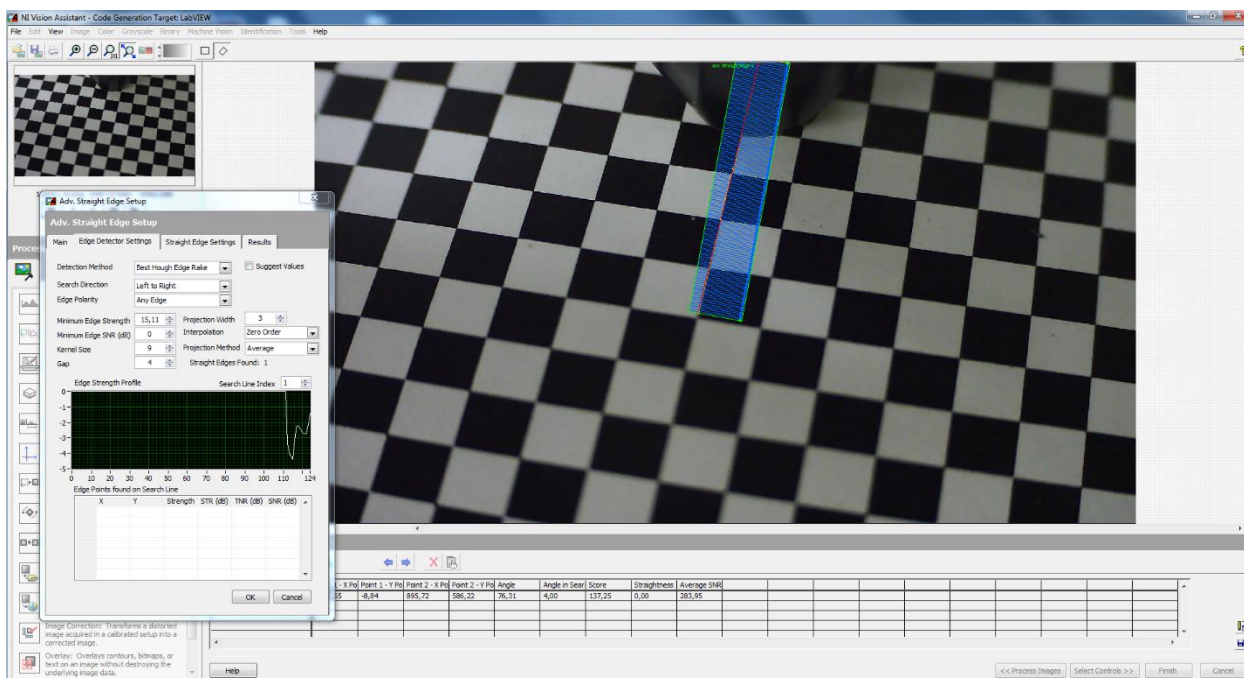


Figura 25 - Seleção da área a inspecionar pelo programa de detecção de linha de junta.

Ao longo da trajetória curvilínea percorrida, há momentos em que apenas uma das câmaras consegue detetar corretamente a linha de junta. Uma vez que as três câmaras estão a capturar imagem e o valor do desvio baseado na imagem de cada câmara é registado a todos os momentos, no final de cada soldadura é necessário decidir que parte dos dados registados serão utilizados. Inspeccionando os gráficos produzidos e as folhas de registo dos valores de desvio, é fácil verificar em que instante uma câmara deixa de detetar corretamente a linha de junta.

As áreas de inspeção foram ajustadas de forma a que quando área de inspeção de uma das câmaras deixa de ser capaz de detetar a linha de junta, haverá sempre uma outra câmara cuja área de inspeção está nesse momento a detetar corretamente a linha de junta, nunca havendo um momento de descontinuidade na aquisição do valor do desvio em análise.

Na Figura 26 pode-se ver assinalado com uma linha laranja, o instante em que o gráfico inferior deixou de fornecer valores estáveis e que nesse instante o gráfico superior já fornecia valores estáveis.

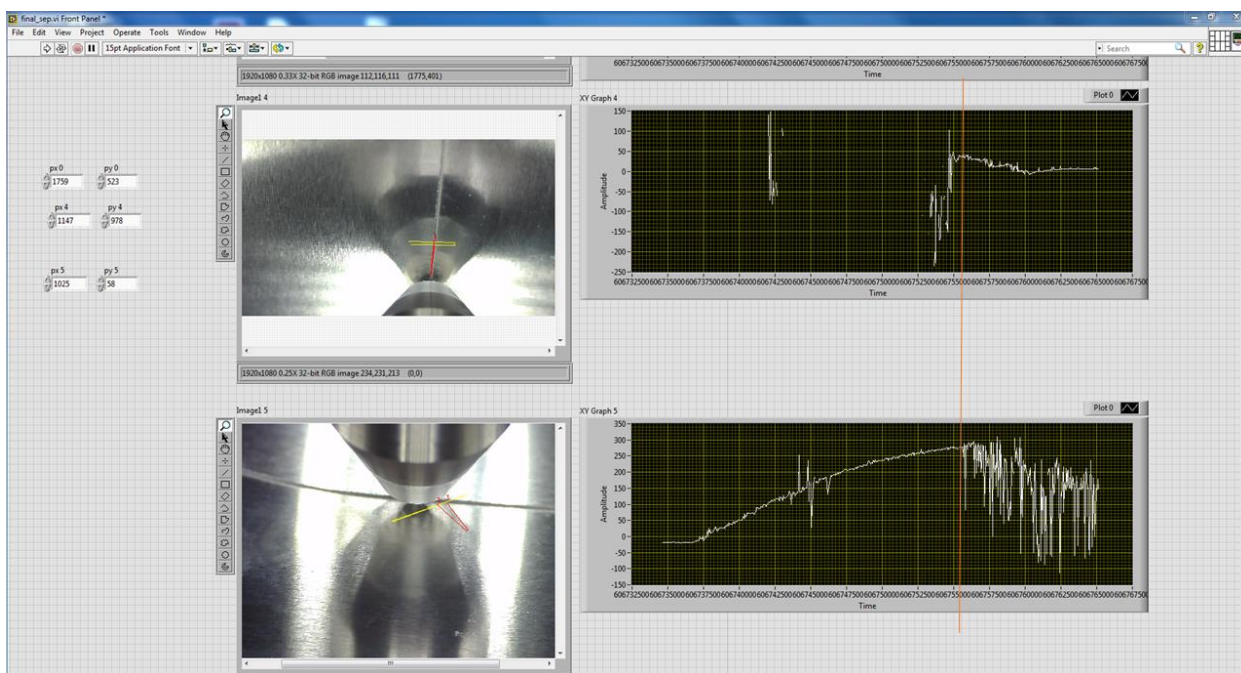


Figura 26 – Momento de transição entre câmaras na deteção de uma linha de junta curvilínea..

5.5 Cálculo do desvio

O cálculo do desvio entre o centro da ferramenta e a linha de junta detetada é feito com recurso ao produto vetorial entre dois vetores de referência:

$$\|\overrightarrow{P_2P_1} \times \overrightarrow{P_2P_c}\| = \|\overrightarrow{P_2P_1}\| \cdot \|\overrightarrow{P_2P_c}\| \cdot \text{sen}(\theta) \quad (5.6.1)$$

Com,

$$\|\overrightarrow{P_2P_c}\| \cdot \text{sen}(\theta) = d \quad (5.6.2)$$

Então

$$d = \frac{\|\overrightarrow{P_2P_1} \times \overrightarrow{P_2P_c}\|}{\|\overrightarrow{P_2P_1}\|} \quad (5.6.3)$$

Onde:

- **d** o desvio entre o centro da ferramenta utilizada e a linha de junta detetada;
- **P_1 e P_2** os pontos extremos da linha detetada, superior e inferior, respetivamente, dentro da área de análise;
- **P_c** o ponto representativo do centro da ferramenta, nas coordenadas da câmara a que este cálculo diz respeito;
- **θ** o ângulo entre $\overrightarrow{P_2P_1}$ e $\overrightarrow{P_2P_c}$.

5.6 Calibrações

Para uma aquisição correta de dados por parte do software utilizado, é necessário fixar alguns parâmetros e calibrar os equipamentos. Feito isto, podem ser executadas quantas soldaduras forem necessárias, sem prejuízo da qualidade dos dados obtidos, desde que as condições fixadas nestas calibrações não se alterem.

5.6.1 Calibração das câmaras

Para ser possível determinar a distância entre a linha de junta e o centro da ferramenta a ser utilizada, a posição e orientação das câmaras relativamente ao robô a que estão fixas, tem de constante durante o decorrer de todas as soldaduras, assim como a distância focal das lentes. A ferramenta utilizada deve também ser a mesma, assim como os elementos de iluminação utilizados e os parâmetros internos seleccionados para a câmara a ser utilizada, como a resolução, o formato da imagem obtida (neste caso RGB 32-bits) e o tempo de exposição do sensor (que aliado ao equipamento de iluminação, fornece uma iluminação constante e sem reflexos indesejados).

Fixados todos estes elementos, é possível determinar as coordenadas do centro da ferramenta utilizada, em cada imagem obtida por cada câmara. A determinação das coordenadas do centro da ferramenta, por parte de cada câmara é feita colocando a ferramenta sobre uma figura padrão, neste caso uma figura com formato axadrezado utilizado comumente para calibração de câmaras em Visão Computacional. O centro da ferramenta deve ser colocada com exatidão sobre um alvo colocado na intersecção dos vértices de 4 quadrados da placa de xadrez. Em seguida utiliza-se o software de deteção de linhas para detetar as arestas que se intersectam no centro do alvo onde se colocou o centro da ferramenta e para extrair as coordenadas da intersecção dessas duas arestas, em cada uma das câmaras, como apresentado na Figura 27. As coordenadas obtidas são posteriormente utilizadas no cálculo do desvio da ferramenta.

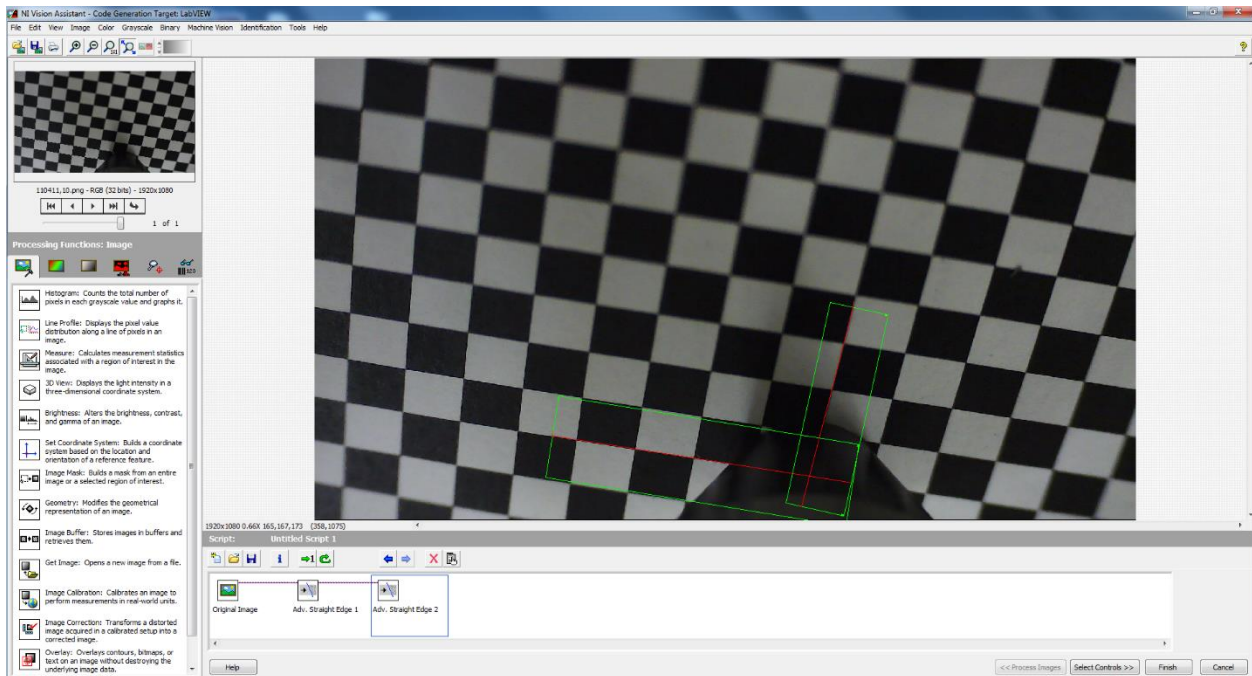


Figura 27 - Determinação das coordenadas do centro da ferramenta.

Qualquer modificação aos elementos fixados inicialmente exigirá uma nova determinação das coordenadas do centro da ferramenta.

5.6.2 Distorção da imagem

A imagem obtida pelas câmaras contém um erro associado à distorção da mesma. No entanto, neste caso esse erro não é significativo como foi provado através de uma simples experiência.

Em primeiro lugar, um par de placas de alumínio foram unidas uma à outra com fita adesiva resistente, em configuração “Butt Joint” e depois o seu conjunto foi unido a uma pequena mesa móvel, capaz de mover a sua parte móvel com uma resolução de 0,005 mm. Um ponto de referência da mesa móvel, que iria permanecer imóvel durante a experiência, foi colocado no centro de uma placa com uma esquadria angular. O conjunto encontra-se representado da Figura 28.

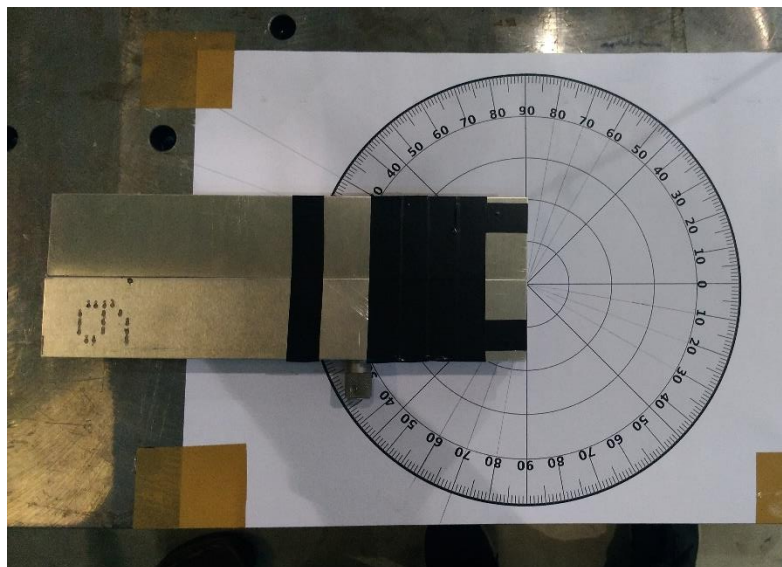


Figura 28 - Equipamento para teste da distorção de imagem.

Em segundo lugar, a ferramenta do robô foi colocada com o “shoulder” à altura das placas fixas à mesa móvel e tangente a essas mesmas placas no ponto de referência escolhido (no centro da esquadria). Desta forma, a câmara que estaria sobre as placas deste equipamento de teste, estaria imóvel durante a experiência, podendo-se focar nas alterações da imagem quando existe um movimento relativo da linha de junta em relação à ferramenta.

Em terceiro lugar, foram feitos incrementos de 0,05 mm e em cada incremento foram registadas as coordenadas (expressas em píxeis da imagem da câmara) dos pontos 1 e 2, pontos de intersecção da linha de junta detetada pelo software com o exterior da área de análise escolhida, como representado na Figura 29.

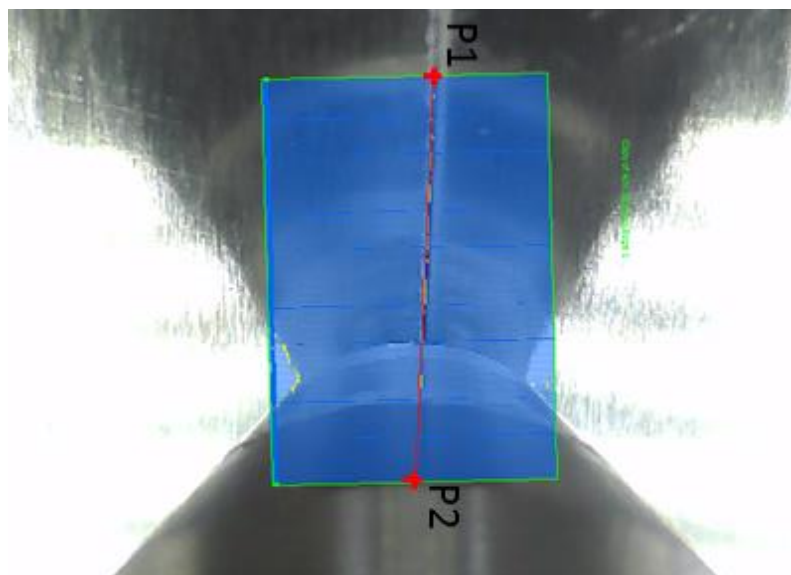


Figura 29 - Pontos detetados no teste de distorção de imagem.

Pretendia-se que ao analisar a diferença entre o número de píxeis que representa a variação da posição dos pontos 1 e 2, em cada incremento de 0,05 mm, se pudesse avaliar a significância da distorção da imagem.

Esta experiência foi repetida para ângulos de 0°, 10°, 20° e 30° entre a linha de junta e a linha de referência de 0° da esquadria.

A média das diferenças de deslocamento dos pontos 1 e 2 na imagem obtida, em píxeis, para todos os incrementos de 0,05 mm em todas as direções ensaiadas, foi de apenas 0,053 píxeis, sendo que a distância entre os pontos 1 e 2 é de cerca de 150 píxeis. Assim, sendo que o centro da ferramenta nunca estará mais do que 750 píxeis afastado da área onde a linha de junta está a ser detetada, assumindo uma relação aproximadamente linear entre a distorção da imagem e a distância ao seu centro, o erro na medição do afastamento da ferramenta relativamente à linha de junta, durante uma soldadura, será sempre menor do que $\frac{0,053 \text{ píxeis}}{150 \text{ píxeis}} \times 750 \text{ píxeis} = 0,265 \text{ píxeis}$. Este valor não representa um valor significativo para a aplicação em questão e como tal, não se considerou imperativo realizar uma calibração das câmaras que diminua o efeito da distorção da imagem.

Desta análise retirou-se também a dimensão média do espaço real correspondente a um píxel na imagem obtida, tendo já em conta a distorção associada e a orientação relativa da câmara em relação à área inspeccionada. Para as várias direções testadas, registou-se a média dos deslocamentos dos pontos P1 e P2, em píxeis, após cada incremento de 0,05mm.

No final calculou-se o quociente entre os 0,05 mm de deslocamento e a média de todos os deslocamentos registados, em píxeis, obtendo assim o valor médio da dimensão do espaço real correspondente a um píxel na imagem obtida. Este cálculo apresenta-se na equação 5.6.2.1.

$$d = \frac{0,05 \text{ mm}}{m \text{ píxeis}} = \frac{0,05}{0,8857} \approx 0,0564 \text{ mm/píxel} \quad (5.6.2.1)$$

Onde:

- “d” é o desvio entre o centro da ferramenta e a linha de junta detetada;
- “m” é a média do número de píxeis correspondentes ao deslocamento de 0,05 mm da linha de junta.

5.6.3 Calibração do software

A nível de software é necessário fixar:

- A área a ser inspeccionada por cada câmara, onde será executado o algoritmo de detecção de linhas, como já foi indicado na secção 5.4.
- Os parâmetros:
 - Método de detecção;
 - Minimum Edge Strength (MES);
 - Minimum Edge SNR (MESNR);
 - Kernel Size (KS);
 - Gap;
 - entre outros, presentes na toolbox utilizada.

Onde:

- MES é a diferença mínima entre os valores da escala de cinza da linha a detetar e do fundo da imagem obtida, necessária para um píxel ser detetado;
- SNR ou Signal-to-Noise Ratio, define a diferença entre um ponto confiável e um ponto não confiável, sendo que quanto maior o SNR, maior a confiabilidade do ponto detetado;
- Minimum Edge SNR é o valor mínimo de SNR para o qual um ponto detetado é aceite;
- Kernel é um operador que calcula uma aproximação local de uma transformada de Fourier da primeira derivada da curva que relaciona os píxeis inspecionados com a sua intensidade na escala de cinzas, como apresentado na Figura 30.
- Gap define o número de linhas de detecção dentro da área em análise;

Os parâmetros devem ser investigados e testados para as condições específicas de cada projeto, até alcançar a combinação dos mesmos que produz bons resultados.

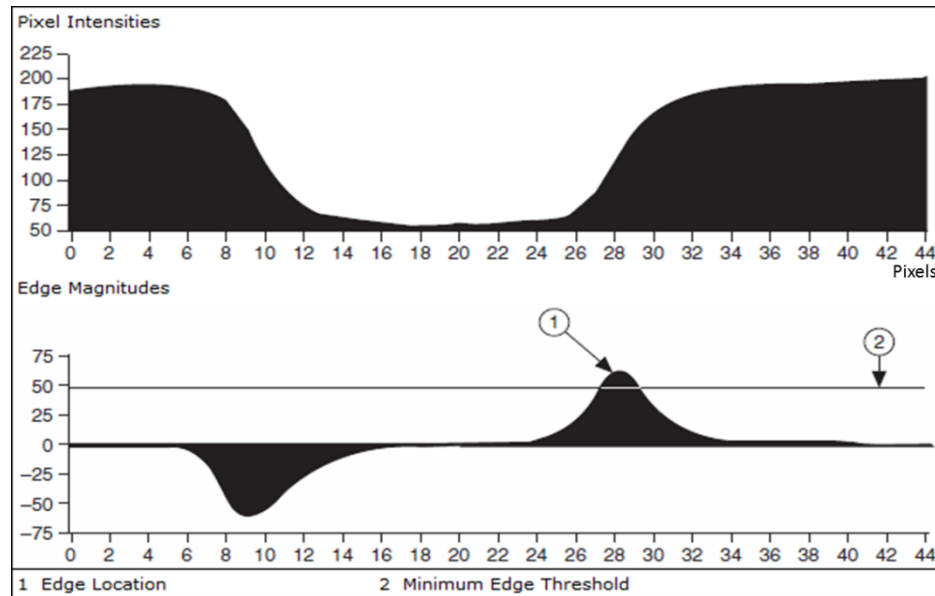


Figura 30 - Gráfico "pixel vs Intensidade de escala de cinzas" de uma área detetada utilizando um operador kernel.

O método de detecção selecionado foi o método "Advanced Edge Detection" por ser mais adequado a casos em que a fronteira a ser detetada não é sempre facilmente detetável por ter pouco contraste com a restante imagem e por ter condições de iluminação adversas [16]. No caso de a razão resolução/área inspecionada ser elevada, como é no caso presente, este método de detecção é capaz de realizar uma análise sub-píxel, podendo-se estimar com uma exatidão de até $1/25$ píxeis, a localização dos pontos detetados [16]. Este valor, somado aos 0,265 píxeis de erro de medição devido à distorção da imagem, perfaz uma exatidão de medição de cerca de 0,305 píxeis.

6 Teste do software desenvolvido

Todos os testes apresentados nas secções seguintes foram repetidos pelo menos 3 vezes para cada combinação de condições (com soldadura, sem soldadura, linha reta, linha curva).

6.1 Precisão de deteção

Durante a execução do programa foram feitos testes para averiguar a qualidade do mesmo.

Como referido no secção 5.6.2, foram feitos testes em que se moveu a linha de junta relativamente à ferramenta, em incrementos de 0,05 mm e se registou as coordenadas de dois pontos afastados, da linha de junta detetada pelo software. Os resultados destes testes demonstraram a exatidão da medição e permitiram que fosse possível considerar aceitável a distorção da imagem obtida e que se dispensasse a calibração da imagem obtida pelas câmaras, com softwares apropriados. Além disso, estes testes permitiram também assegurar que a deteção da linha de junta é feita com elevada precisão. Podemos ver no Gráfico 2 medições feitas para um ângulo de 30° entre a linha de junta e a linha de referência colocada na esquadria sob a mesa móvel, com incrementos de 0,1 mm.

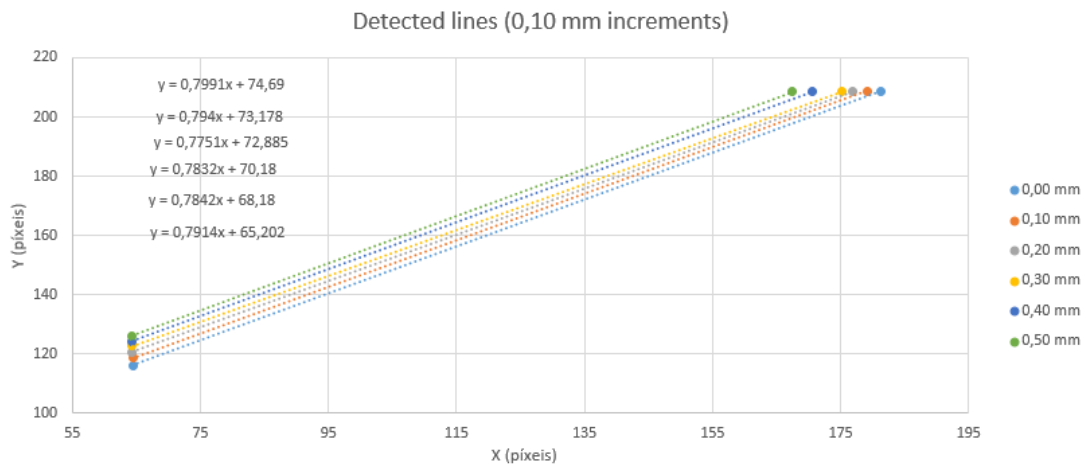


Gráfico 2 - Medições feitas para um ângulo de 30° entre a linha de junta e a linha de referência colocada na esquadria sob a mesa móvel, com incrementos de 0,1 mm.

Como se pode ver, as linhas detetadas são praticamente paralelas e equidistantes, o que suporta a precisão do método de detecção da linha de junta.

6.2 Teste dinâmico do programa desenvolvido (sem execução de soldadura)

Após verificar a exatidão e precisão da detecção da linha de junta de forma estática, foi testado o mesmo programa de forma dinâmica, fazendo o robô mover-se sobre uma linha de junta com troços retilíneos e curvilíneos, como apresentado na Figura 31, sem execução de soldadura, extraindo o valor do desvio a cada momento para uma folha de cálculo, de forma automática.

Durante este teste verificou-se também se a linha de junta seria detetada a todos os momentos e ajustou-se as áreas de detecção para garantir que tal aconteça, analisando a imagem obtida e os gráficos traçados em tempo real presentes no ambiente de interface com o utilizador.

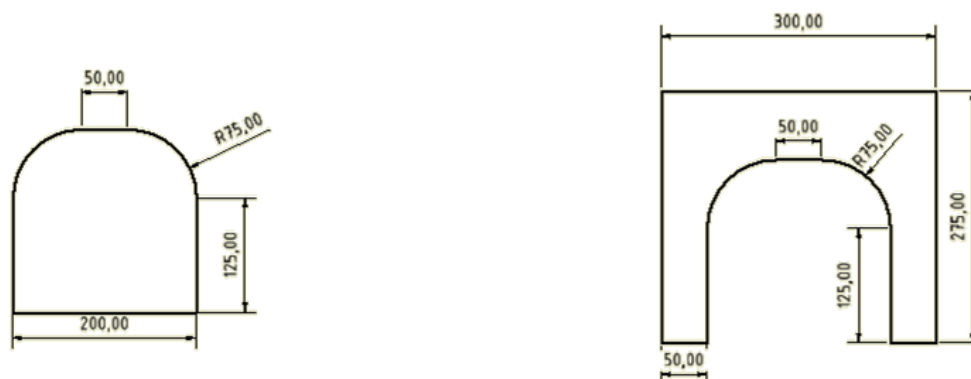


Figura 31 - Partes constituintes da placa de teste utilizada. Linha de contacto representa a linha de junta.

A linha de junta em causa é a linha comum entre as duas partes da Figura 31, com dois troços lineares de 125 mm e um de 50 mm e dois troços circulares de 75 mm de raio.

Apresentam-se em seguida os gráficos obtidos neste teste no troço linear e no troço circular, em Gráfico 3 e Gráfico 4, respetivamente.

O eixo vertical dos gráficos representa o valor do desvio entre o centro da ferramenta e a linha de junta detetada, em píxeis, enquanto que o eixo horizontal é um eixo temporal.

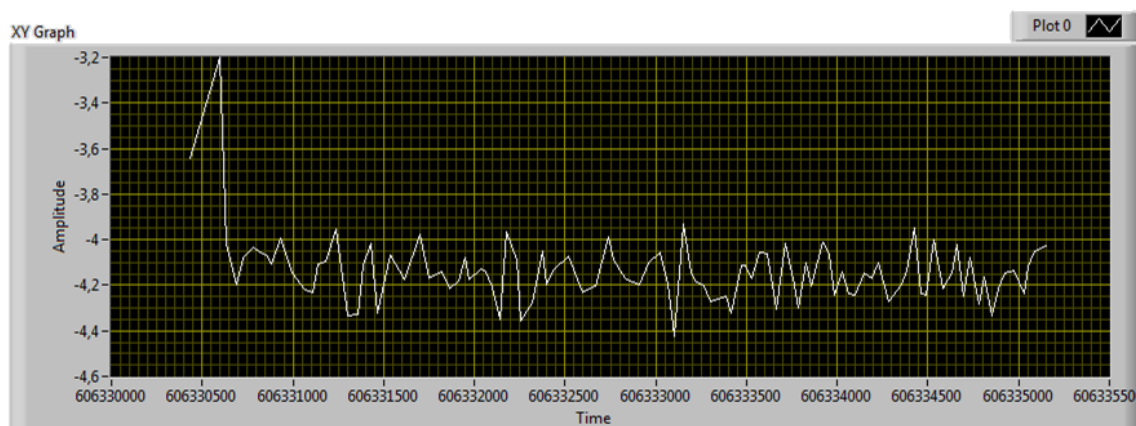


Gráfico 3 - Gráfico de deteção do troço linear da linha de junta.

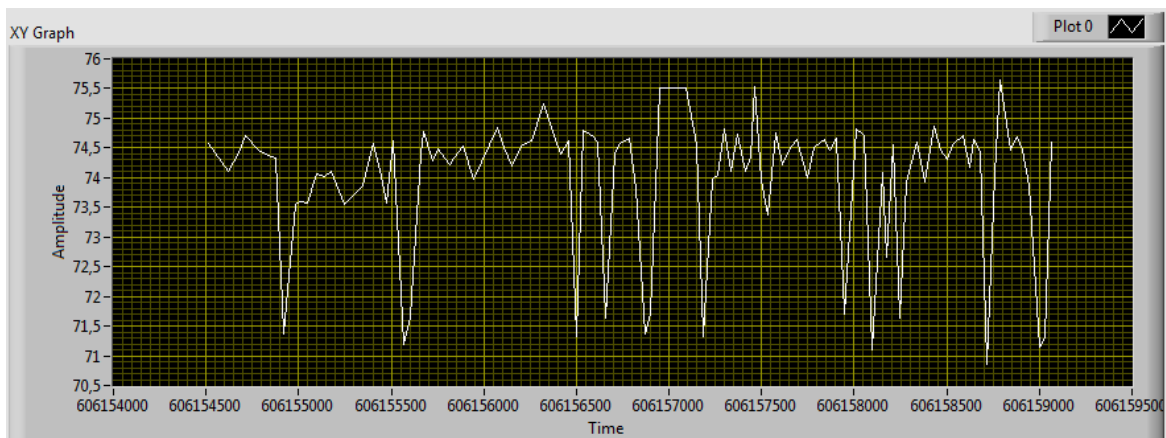


Gráfico 4 - Gráfico de detecção do troço curvilíneo da linha de junta.

Podemos verificar que para a detecção de linhas retas, o valor do desvio é determinado com um erro máximo de cerca de 0,14 píxeis em torno da curva de regressão polinomial seleccionada, valor perfeitamente aceitável nesta aplicação.

As curvas de regressão polinomial são seleccionadas de tal forma que o grau do polinómio é o menor possível, contanto que o valor de R^2 se seja superior a 0.96. Ignorando as variações acentuadas, presentes no Gráfico 4, que podem ser retiradas com um filtro apropriado, o erro de detecção médio de linhas curvas em torno da curva de regressão polinomial seleccionada é da mesma ordem de grandeza que o erro na detecção de linhas retas (0,25 píxeis) e como tal, perfeitamente aceitável nesta aplicação.

Uma vez que a ferramenta se move sem carga ao longo da trajetória de teste, seria de prever que o valor do desvio nos troços curvilíneos fosse semelhante ao dos troços retilíneos, o que não acontece, como se pode constatar comparando o Gráfico 3 e Gráfico 4. Isto deve-se ao facto de o algoritmo de detecção utilizado para as linhas curvas, ter sido o mesmo que foi utilizado para linhas retas, pois o objetivo deste projeto era apenas o de detetar a linha de junta e fazer algum tipo de registo que permitisse posteriormente calcular o desvio desta em relação à ferramenta.

Teve-se o cuidado de utilizar uma pequena área de análise, para que o troço curvilíneo analisado se aproxime o mais possível de um troço retilíneo, como representado na Figura 32;

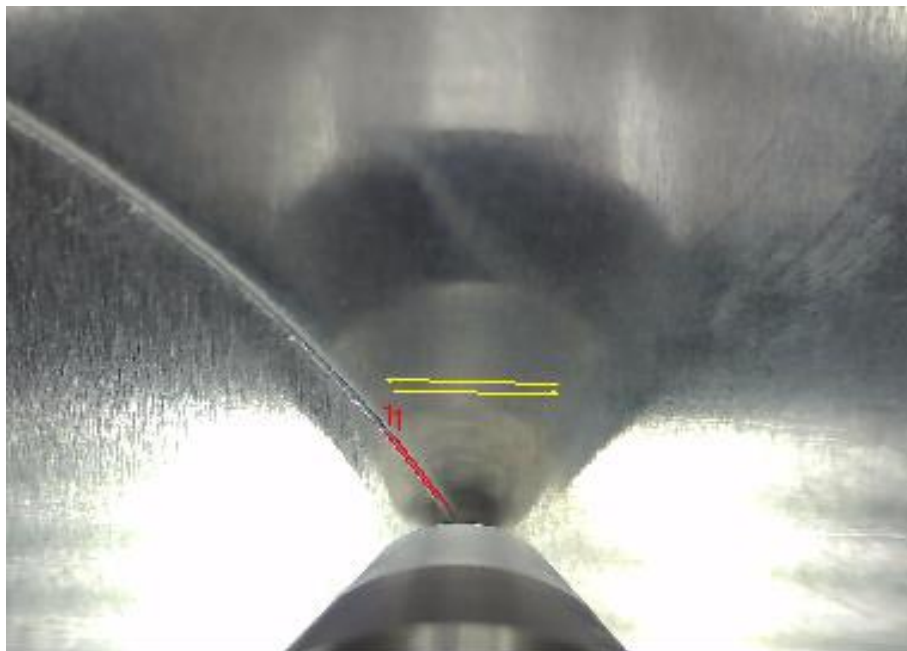


Figura 32 - Linha detetada aproximadamente retilínea, num troço curvilíneo.

Ainda assim, a aproximação de um segmento de linha curva por um segmento de linha reta e o facto de o início desse segmento de linha reta se iniciar a uma distância ainda considerável do centro da ferramenta, levam a que o erro no cálculo do desvio possa ser muito elevado, como é o caso do valor apresentado no Gráfico 4.

Apesar de isto significar que o valor obtido do desvio em troços curvilíneos não seja ainda correto, é ainda possível no futuro utilizar os dados brutos registados para recalculer o valor do desvio em troços curvilíneos. Pode-se também, por exemplo, gravar o vídeo obtido pelas câmaras durante o seu percurso e analisá-lo posteriormente com um novo algoritmo mais apropriado para a deteção de linhas curvas.

Volta-se a frisar que o objetivo deste projeto não era o de calcular com rigor o valor do desvio em trajetos curvilíneos mas sim o de ser capaz de detetar a linha e guardar dados que permitissem que esse cálculo mais rigoroso do desvio pudesse ser feito no futuro. Era sim um objetivo do projeto, provar que a medição era precisa, e tal foi provado verificando que o erro do desvio calculado está na casa das décimas de píxel, que representa um valor ainda menor de centésimas de milímetro.

6.3 Teste dinâmico do programa desenvolvido (com execução de soldadura)

Antes de iniciar os testes com execução de soldadura FSW, fizeram-se ensaios para determinar quais os parâmetros a colocar no controlo do processo de modo a modificar a quantidade de rebarba existente na soldadura executada e assim poder testar a robustez do programa desenvolvido às diferenças de qualidade de soldadura.

O controlo do processo é feito por um programa desenvolvido em LABVIEW, previamente existente no departamento da empresa onde se desenvolveu este projeto.

Valores indicativos de uma soldadura de boa qualidade (rebarba praticamente inexistente e zonas vazias não existentes):

- Parâmetros de penetração (Plunge)
 - Plunge Force – 4500 N;
 - Plunge Speed – 1150 rpm;
 - Plung Temperature – 475 °C;

- Parâmetros de soldadura:
 - Axial Force – 4500 N;
 - Weld rotating speed – 800 rpm;
 - Tilt – 0,2°;
 - Weld Speed – 5 mm/s;

Executaram-se soldaduras FSW na junta das placas apresentadas na Figura 31, com estes parâmetros e com parâmetros que produziam soldaduras com mais rebarba, como visível nas Figura 33 e Figura 34 e analisaram-se os resultados obtidos.

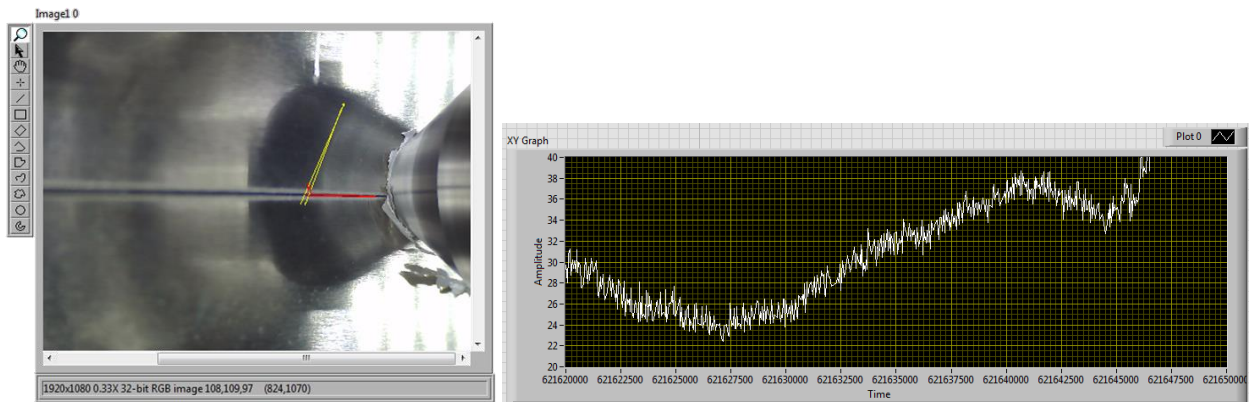


Figura 33 - Soldadura FSW com moderada quantidade de rebarba e respetiva representação temporal do valor do desvio.

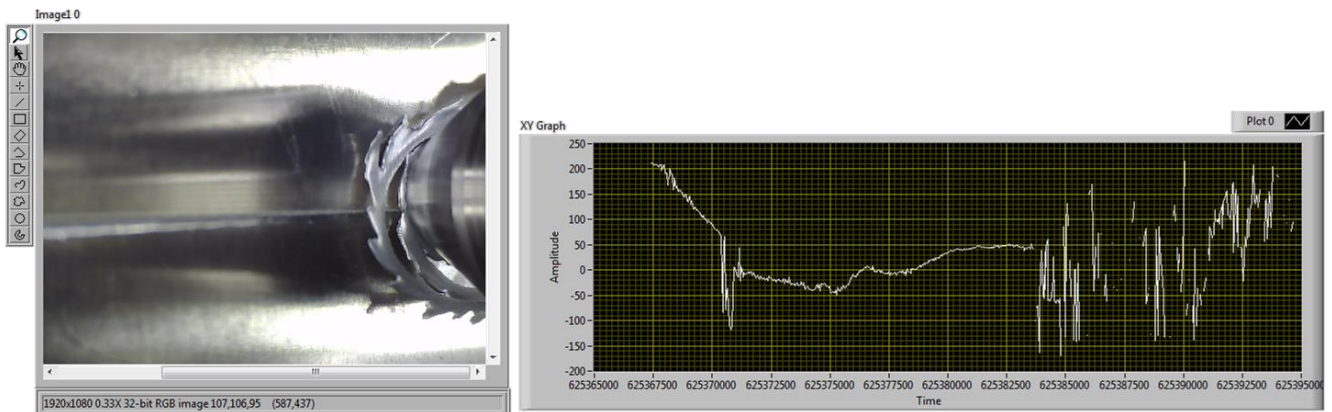


Figura 34 - Soldadura FSW com elevada quantidade de rebarba e respetiva representação temporal do valor do desvio.

Relativamente à precisão da medição, podemos ver que esta é ligeiramente menor do que nos testes sem soldadura. Executando soldadura, o erro médio de medição é de cerca de 0.9 píxeis no caso de linhas retas e 0.99 píxeis no caso de linhas curvas, o que continuam a ser valores perfeitamente aceitáveis. Deduz-se que esta diferença se deva às vibrações existentes durante a soldadura.

6.3.1 Influência da qualidade da soldadura na deteção da linha de junta

Sempre que a rebarba criada durante o processo de soldadura tinha uma dimensão semelhante à da Figura 33, a sua existência não influenciava a deteção da linha de junta.

Contrariamente, quando a rebarba criada se aproxima da dimensão apresentada na Figura 34, o programa de deteção deixa de ser capaz de detetar corretamente a linha de junta e o gráfico respetivo apresenta valores aleatórios, como se pode verificar na extremidade direita da Figura 34.

Comprova-se assim que o programa de deteção é robusto relativamente à existência de uma pequena quantidade de rebarba, o que significa que é robusto à variação da qualidade da soldadura.

Mesmo em soldaduras mais complexas, qualquer empresa que produza soldaduras FSW tipicamente não admite a existência de rebarbas de dimensão superior à apresentada na Figura 33, podendo então este programa ser utilizado em qualquer soldadura FSW de qualidade aceitável.

6.4 Resumo de resultados de precisão e exatidão

Em seguida apresenta-se uma tabela-resumo de valores de precisão e exatidão da medição do desvio obtidos nos testes efetuados em toda a secção 6.

Tabela 1 – Tabela-resumo de valores de precisão e exatidão da medição do desvio.

	Linha reta				Linha curva			
	Sem soldadura		Com soldadura		Sem soldadura		Com soldadura	
	píxeis	μm	píxeis	μm	píxeis	μm	píxeis	μm
Precisão	0,14	7,90	0,90	50,76	0,25	14,10	0,99	55,84
Exatidão	0,305 píxeis / 0,017 mm				*			

*Uma vez que o algoritmo de deteção da linha de junta e cálculo do desvio não considera curvatura, esta solução não é ainda capaz calcular com elevada exatidão o desvio quando a ferramenta percorre linhas curvas. Assim, não é cabível apresentar valores de exatidão para o caso de linhas curvas.

Os valores de precisão apresentados na Tabela 1 são obtidos executando a diferença entre cada valor de desvio obtido e uma curva de regressão polinomial apropriada, para cada ensaio e por fim determinando o valor máximo das diferenças obtidas, filtrando valores isolados e pontuais que nitidamente resultam de irregularidades imprevistas como reflexos luminosos. A curva de regressão selecionada será uma curva de regressão polinomial de menor grau possível, contanto que o valor de R^2 seja superior a 0,96.

Utilizam-se as referidas curvas de regressão linear por facilidade de análise, no entanto, numa fase futura de desenvolvimento desta solução poderá ser usada uma análise de média móvel simultaneamente à aquisição de dados, para utilizar o valor dessa média móvel como valor de entrada no feedback para controlo de posição. A título de exemplo, fez-se uma análise de média móvel simples, de período igual a 2, aos resultados dos ensaios para linhas curvas com soldadura

e o valor médio de desvio diminuiu de 0,99 para 0,64 píxeis, o que representa uma diminuição de cerca de 35%.

No caso a detecção de linhas retas durante a soldadura, cada medição tem uma precisão de 0,051 mm e uma exatidão de 0,017 mm, o que significa que o erro máximo de medição do desvio será de 0,068 mm que é um valor pelo menos uma ordem de grandeza menor do que os valores máximos admissíveis para o desvio de trajetória durante a soldadura. Conclui-se que a medição é adequada ao problema em questão.

7 Conclusões e Trabalhos Futuros

No desenvolver deste projeto concluiu-se que a utilização de uma solução baseada em Visão Computacional para medição de desvios da ferramenta de soldadura FSW em relação à linha de junta entre duas placas a unir, é adequada e fornece resolução, exatidão e precisão elevadas, robustez relativamente à qualidade da soldadura efetuada, assim como forte potencial de evolução futura. Desta forma o departamento onde este projeto se desenvolveu terá uma possibilidade real, com relativa facilidade, de utilizar a solução desenvolvida e a integrar na solução global do projeto onde esta dissertação se insere, ou seja, desenvolver uma solução capaz de compensar em tempo real o desvio de trajetória do robô industrial utilizado, durante uma soldadura FSW.

Concluiu-se também que sistemas de Visão Computacional podem ser integrados nos mais diversos tipos de soluções industriais de medição e controlo de processos, fornecendo resultados de elevada qualidade e sem um investimento extremamente elevado, seja este financeiro ou de tempo necessário dispendido para desenvolver uma solução funcional.

Este projeto de dissertação consistiu apenas no início do desenvolvimento da solução final pretendida, para melhoria efetiva em tempo real das soldaduras executadas com o equipamento existente no departamento onde decorre o projeto. Assim, no futuro é necessário melhorar a solução produzida e continuar a desenvolvê-la.

Os investimentos futuros neste projeto podem passar por:

- Integrar a medição do desvio no controlo de trajetória do robô;
 - Para tal require-se que o programa seja melhorado de forma que:
 - seja implementado um algoritmo apropriado para detetar curvas e calcular com exatidão o desvio quando a ferramenta se encontra sobre uma linha curva;
 - se inclua uma calibração das câmaras por forma a compensar a distorção das suas imagens;
 - apenas sejam registados os valores de desvio calculados pela câmara que num dado momento seja considerada a “câmara ativa”, câmara esta que deverá ser a que está em melhor posição de realizar uma boa medição;

- os valores de desvio calculados a cada momento sejam filtrados em tempo real, havendo em cada período de atualização do controlador, apenas um valor para a variável “desvio” a ser introduzida no loop de controlo de movimento e não levando em conta valores de desvio que não fazem sentido. Para tal, pode ser utilizada uma média móvel simples, como referido na secção 6.3 ou uma média móvel exponencial que dá maior peso aos dados mais recentes;
- Investigar uma possível inclusão de filtros de luz, para que não haja qualquer influência relevante da iluminação utilizada, podendo introduzir a solução desenvolvida num ambiente diferente;
- Investigar formas de aumentar a taxa de atualização da posição/trajetória do robô, por parte do seu controlador;

Neste projeto testou-se qual a velocidade de execução do programa desenvolvido e verificou-se que variando a frame rate da câmara, a frequência de execução do programa é sensivelmente igual à frame rate até aos 60 fps ou Hz, sendo que para valores superiores a frequência de execução do programa é menor do que a frame rate. Será então de maior interesse aumentar a frequência de atualização por parte do controlador para pelo menos 60 Hz ao invés dos atuais 5-10 Hz.

- Para tal, pode-se investigar a utilização de EGM (Externally Guided Motion), uma nova funcionalidade dos robôs ABB que permite sensores e controladores externos controlarem o movimento do robô com uma resposta muito rápida, tipicamente entre 50 e 125 Hz ⁶.

Para aproveitar essa maior frequência de atualização, pode-se também dividir o programa desenvolvido em partes menores e utilizar um núcleo de processador ou um microprocessador dedicados a cada parte do programa dividido ou então converter tudo na linguagem de programação C++, que tem uma mais rápida taxa de execução.

⁶ Fonte: <http://www.machinedesign.com/motion-control/new-software-helps-control-your-industrial-robot>, consulta a 05/2017

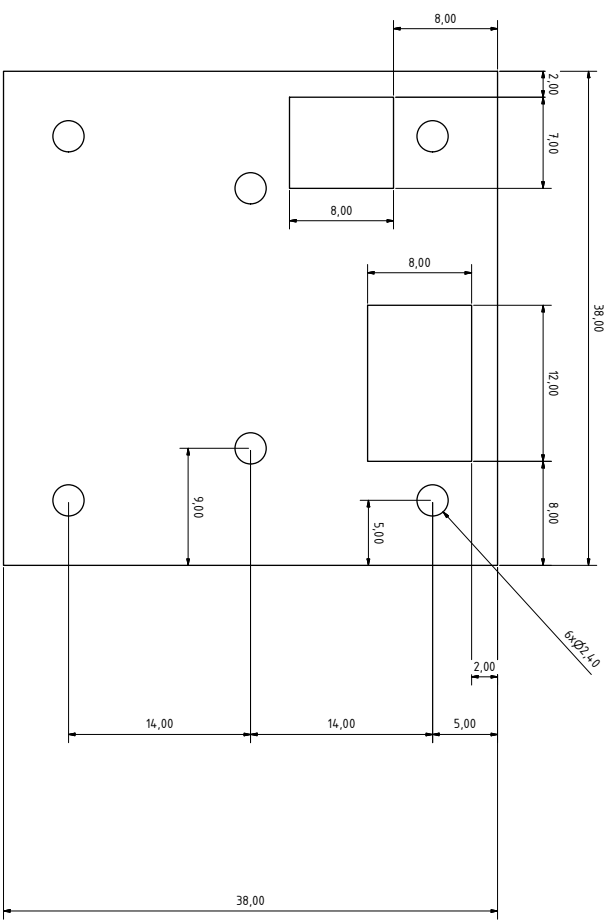
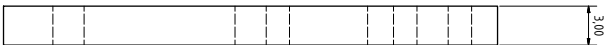
Referências

- [1] - Babu, K. T., Kumar, P. K., & Muthukumaran, S. (2014). Mechanical, Metallurgical Characteristics and Corrosion Properties of Friction Stir Welded AA6061-T6 Using Commercial Pure Aluminium as a Filler Plate. *Procedia Materials Science*, 6, 648–655. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.080>
- [2] - Gibson, B. T., Lammlein, D. H., Prater, T. J., Longhurst, W. R., Cox, C. D., Ballun, M. C., ... Strauss, A. M. (2014). Friction stir welding: Process, automation, and control. *Journal of Manufacturing Processes*, 16(1), 56–73. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.04.002>
- [3] - Montolíó, S., “*Robot Behaviour Monitoring in Friction Stir Welding*”, Dissertação de Mestrado, Division of Automation Systems, Höskolan Väst, Suécia, 2015.
- [4] - Backer, J., “*Feedback Control of Robotic Friction Stir Welding*”, Tese de Doutorado, Division of Automation Systems, Höskolan Väst, Suécia, 2014.
- [5] - De Backer, J., Christiansson, A., Oukea, J., & Bolmsjö, G. (2012). Investigation of path compensation methods for robotic friction stir welding. *Industrial Robot: An International Journal*, 39(6), 601–608. <https://doi.org/10.1108/01439911211268813>
- [6] - De Luca, A. (2000). Proceedings 2000 ICRA. Millennium Conference. IEEE International Conference on Robotics and Automation. Symposia Proceedings (Cat. No.00CH37065), Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2000.844064>
- [7] - Qin, J., Léonard, F., & Abba, G. (2016). Real-Time Trajectory Compensation in Robotic Friction Stir Welding Using State Estimators, 24(6), 2207–2214.
- [8] - Zeng, Y., Tian, W., & Liao, W. (2016). Positional error similarity analysis for error compensation of industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.05.011>
- [9] - Huang, S., Bergström, N., Yamakawa, Y., Senoo, T., & Ishikawa, M. (2016). Applying high-speed vision sensing to an industrial robot for high-performance position regulation under uncertainties. *Sensors (Switzerland)*, 16(8), 1–16. <https://doi.org/10.3390/s16081195>
- [10] - Liu, Y., Xi, N., Shen, Y., Li, X., Zhang, G., & Fuhlbrigge, T. A. (2009). Position-Sensitive Detector (PSD) Guided Servoing Method for Industrial Robot Calibration. *International Journal of Optomechatronics*, 3(2), 116–132. <https://doi.org/10.1080/15599610902894584>
- [11] - Smith, G. C., & Smith, R. A. (2006). A non-contact method for detecting on-line industrial robot position errors using a microwave doppler radar motion detector. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 29(5–6), 605–615. <https://doi.org/10.1007/BF02729115>

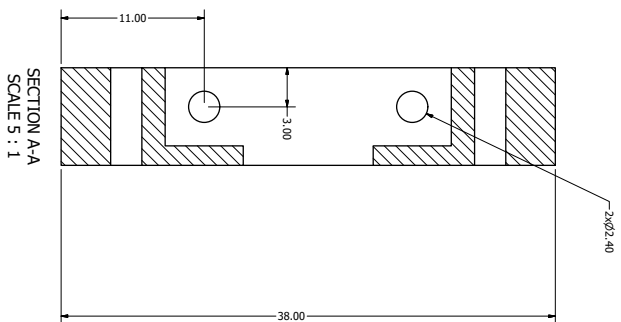
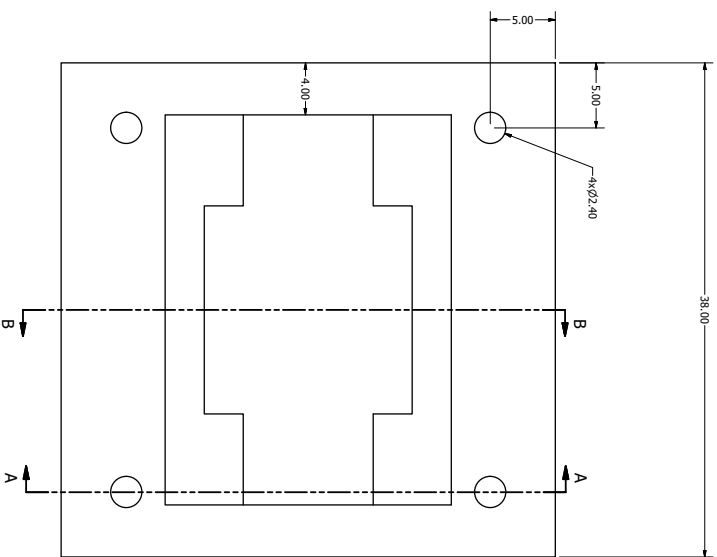
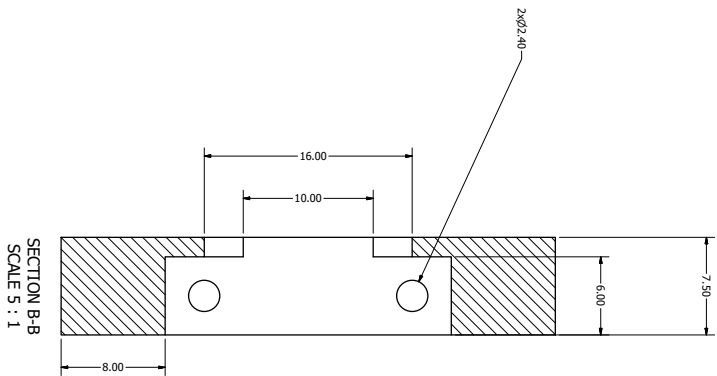
- [12] - Delibasis, K. K., Plagianakos, V. P., & Maglogiannis, I. (2015). Estimation of robot position and orientation using a stationary fisheye camera. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 24(6). <https://doi.org/10.1142/S0218213015600040>
- [13] - Marônek, M., Bárta, J., & Ertel, J. (2015). Inaccuracies of industrial robot positioning and methods of their correction. *Tehnicki Vjesnik - Technical Gazette*, 22(5), 1207–1212. <https://doi.org/10.17559/TV-20140416123902>
- [14] - Vorotnikov, A., Bashevskaya, O., Ilyukhin, Y., Romash, E., Isaev, A. V., & Poduraev, Y. (2016). Geometrical Approach for Industrial Robot Axis Calibration Using Laser Tracker, (2016), 0897–0904. <https://doi.org/10.2507/26th.daaam.proceedings.125>
- [15] - Hornberg, A., *Handbook of Machine Vision*. John Wiley & Sons, 361 – 426, 2007.
- [16] - Instruments, N. (2000). *IMAQ Vision Concepts Manual*, National Instruments.
- [17] - Guillo, M., & Dubourg, L. (2016). Impact & improvement of tool deviation in friction stir welding: Weld quality & real-time compensation on an industrial robot. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.11.001>

Anexo 1

Desenhos de construção das partes constituintes do suporte das câmaras



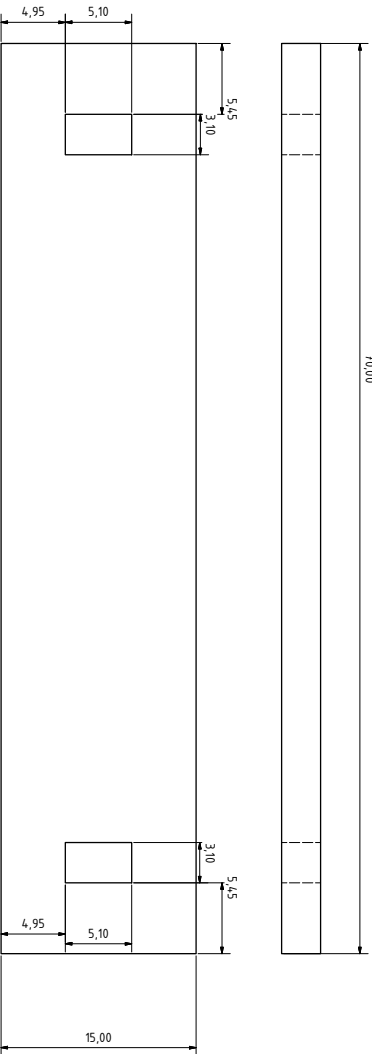
DRAWN	4/7/2017	TITLE	
CHECKED			
QA			
WKS			
APPROVED			
SIZE	D	DWG NO	Back cover
SCALE	5 : 1	SHEET 1 OF 1	REV



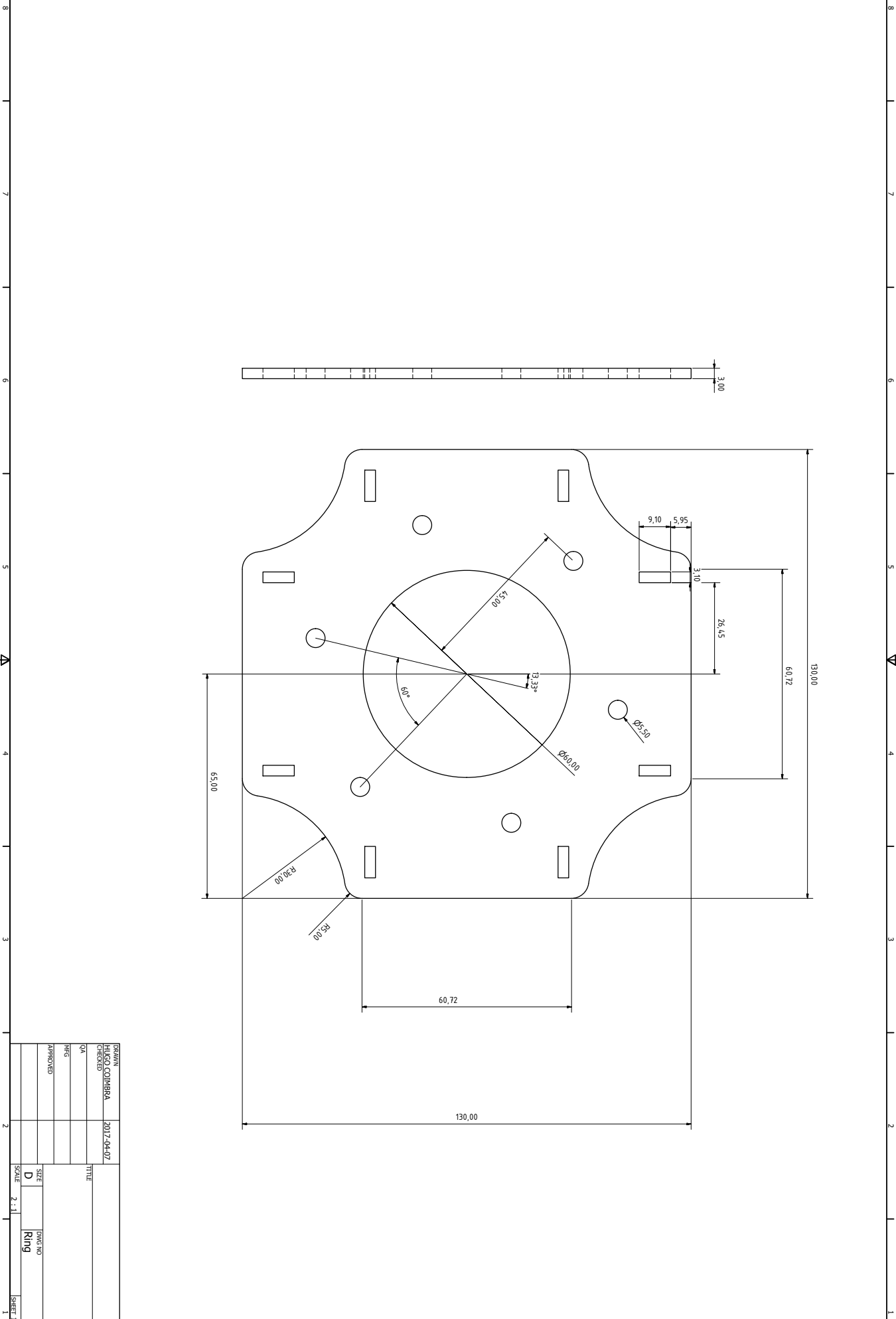
DRAWN	2017-04-07	TITLE	
CHECKED	huc00002		
QA			
WFG			
APPROVED		Dwg. NO	
		Front Cover	
		REV	

SCALE 5 : 1

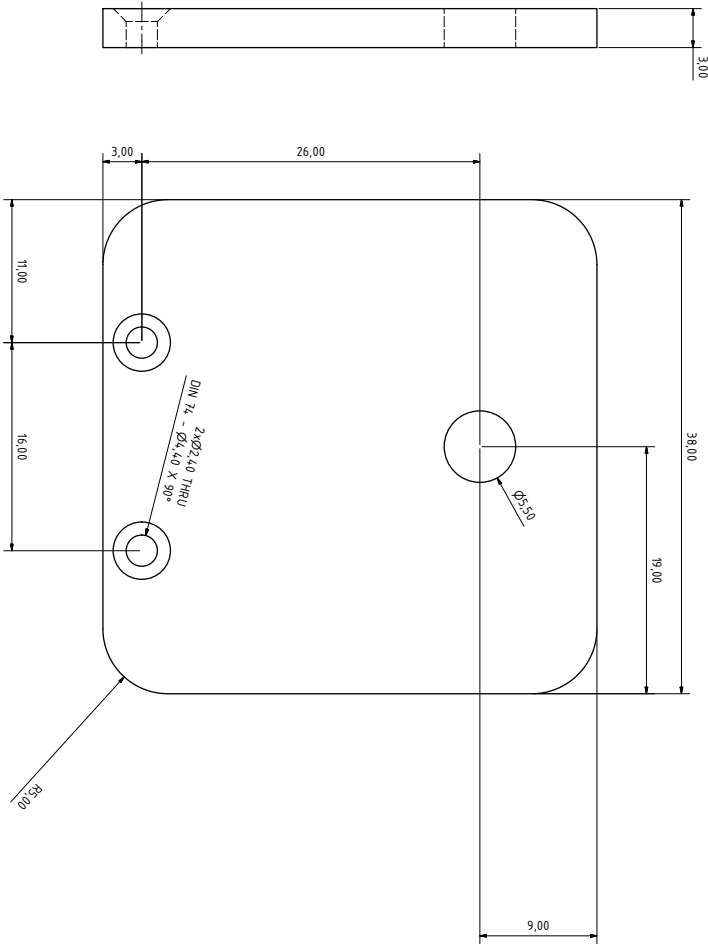
SHEET 1 OF 1



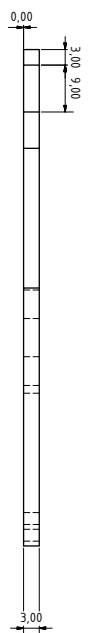
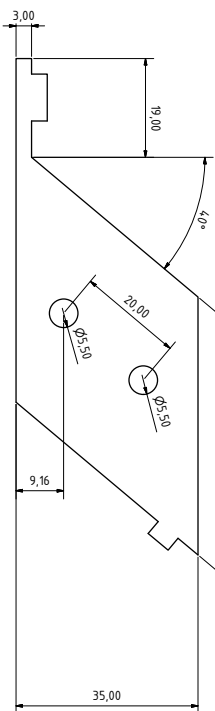
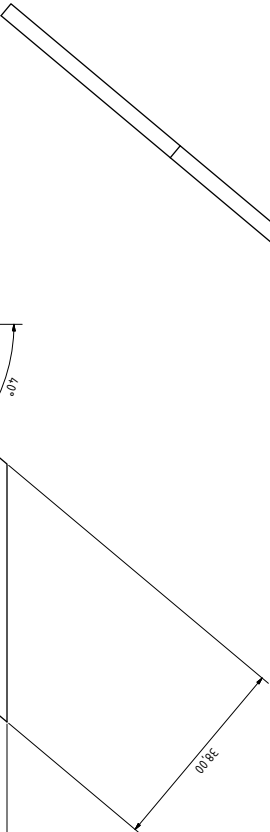
DRAWING																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
---------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--



Technical drawing of a circular plate with a central hole and eight rectangular slots. The drawing includes dimensions: outer diameter 130.00, inner hole diameter 60.00, slot width 13.33, and slot depth 3.10. A scale bar at the bottom indicates 0 to 7 cm.



DRAWN	4/7/2017	TITLE	
CHECKED			
QA			
WKS			
APPROVED		Dwg. NO. Rotating part2	
		SIZE D	REV
		SCALE 5 : 1	SHEET 1 OF 1



CHASANI	
HIGSON COMBREA	2017-04-07
CHECKED	
QA	
DWG	
APPROVED	
TITLE	
SIZE	DWG NO.
SHEET 2 : 1	Titled adjuster SHEET 1 OF 1
DATE	REV

Anexo 2

Programa de detecção de linha de junta e cálculo do desvio, desenvolvido em
LABVIEW®

